

电机学

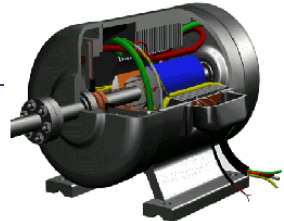
异步电机的理论分析与运行特性

东南大学电气工程学院

黄允凯



东南大学
电气工程学院



1

异步电机的基本结构

2

异步电机的运行状态和磁场

3

三相异步电机的等效电路

4

异步电机的参数

5

异步电动机的功率平衡式和转矩平衡式

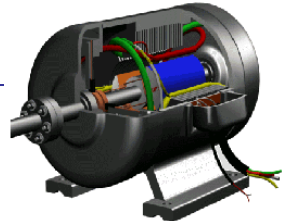
6

异步电动机的机械特性及稳定运行条件

7

异步电动机的工作特性



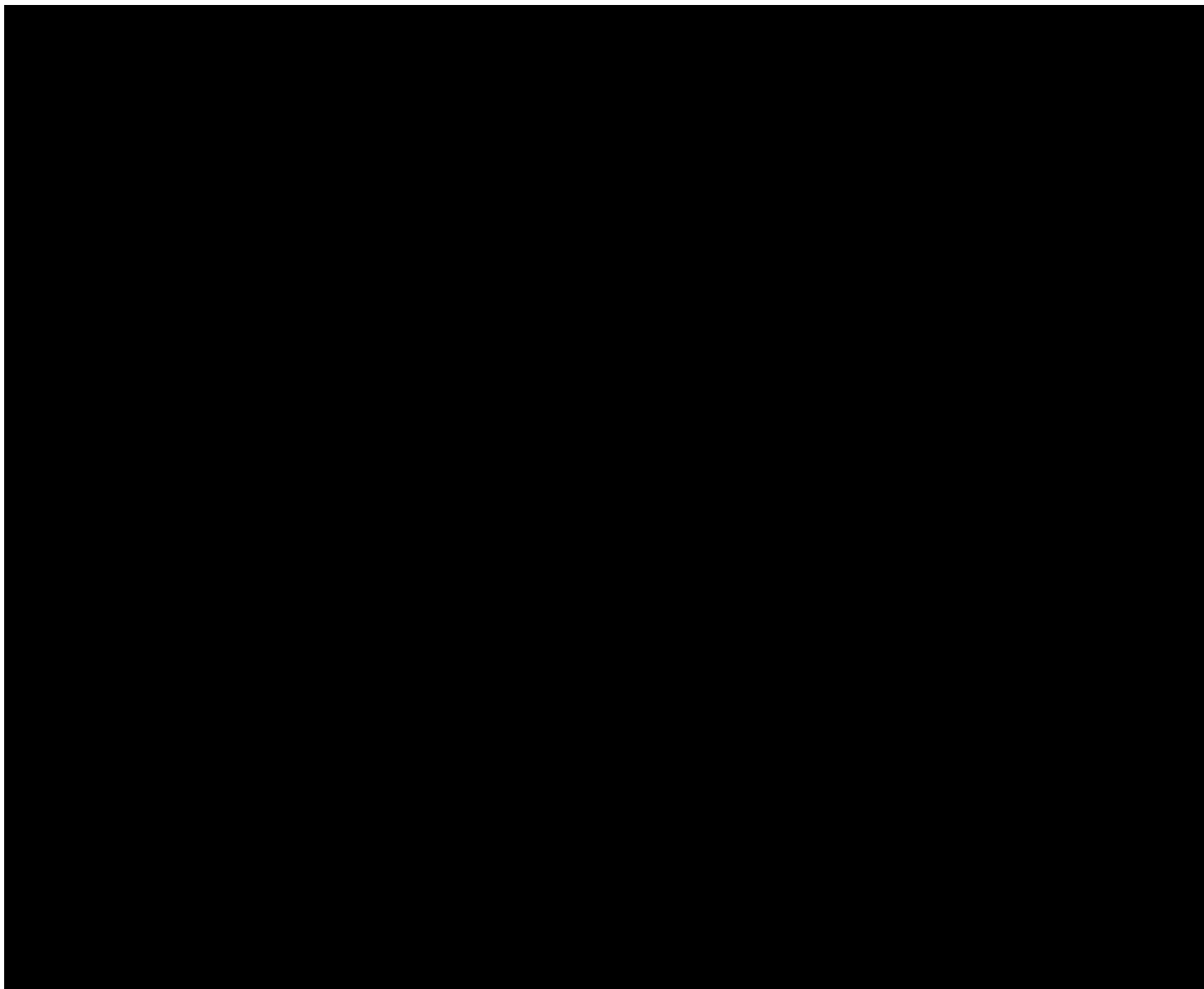


异步电机特点

- 异步电机，转子转速 n 与磁场同步转速 n_1 间存在一定差异。asynchronous
- 优点：结构简单，制造、使用和维护方便，运行可靠，效率较高，价格低廉，坚固耐用。
- 缺点：
 - ①转速不易调节
 - ②鼠笼式异步电动机的起动性能较差
 - ③功率因数滞后，激磁电流由电网供给

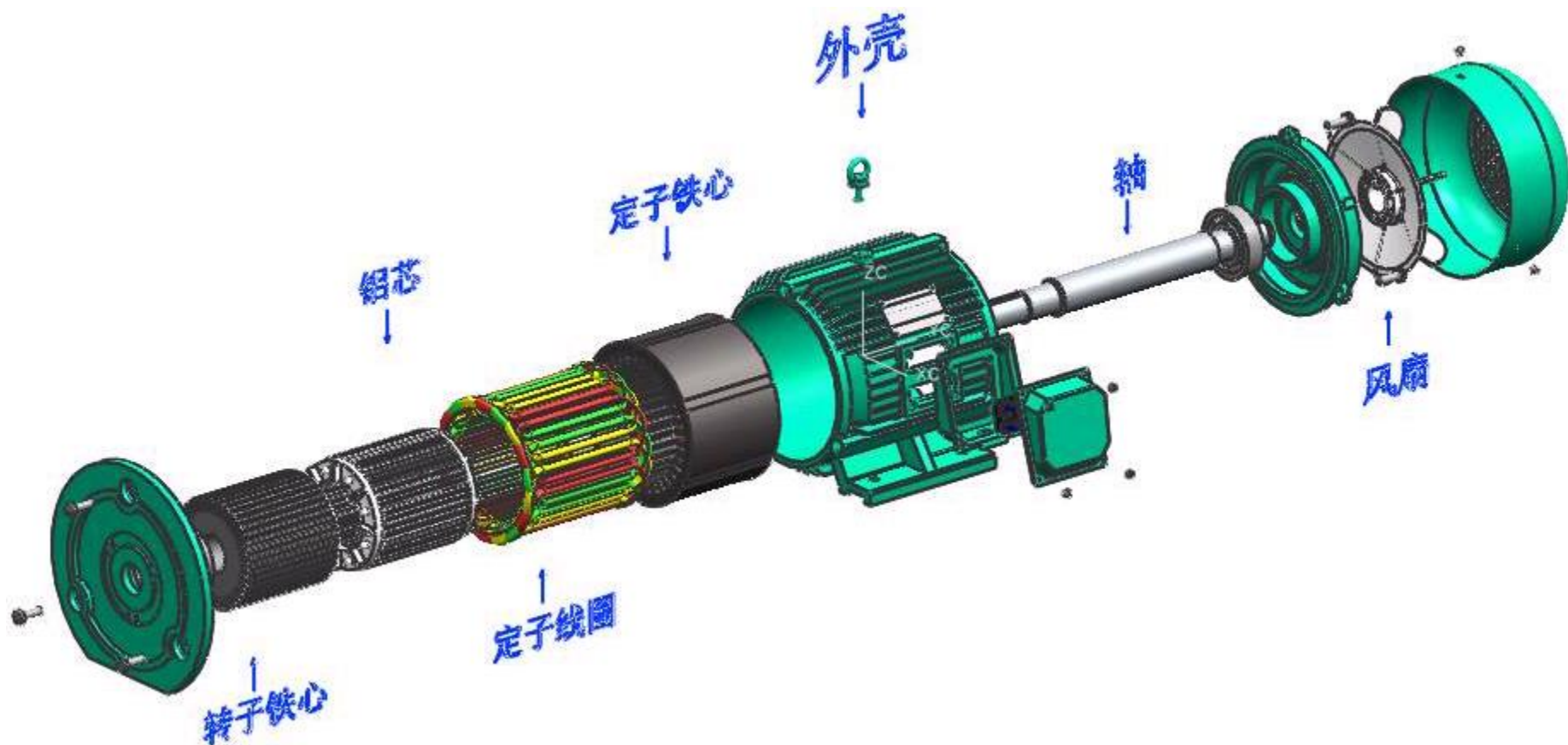


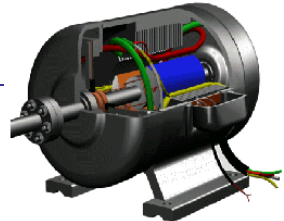
异步电机的基本结构





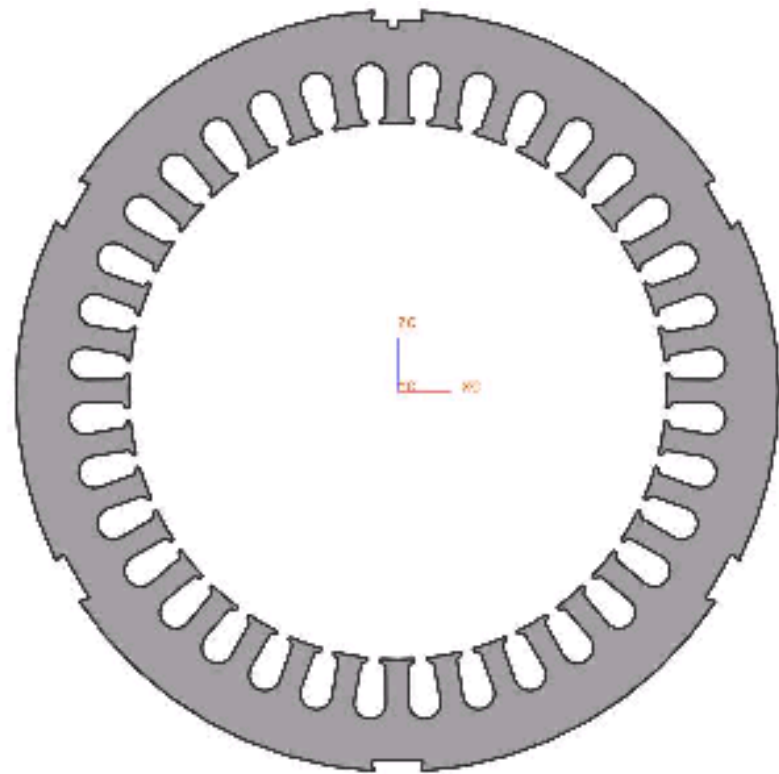
基本结构





定子：由铁芯、绕组和基座组成

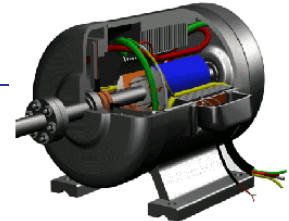
- 定子铁芯（stator core）



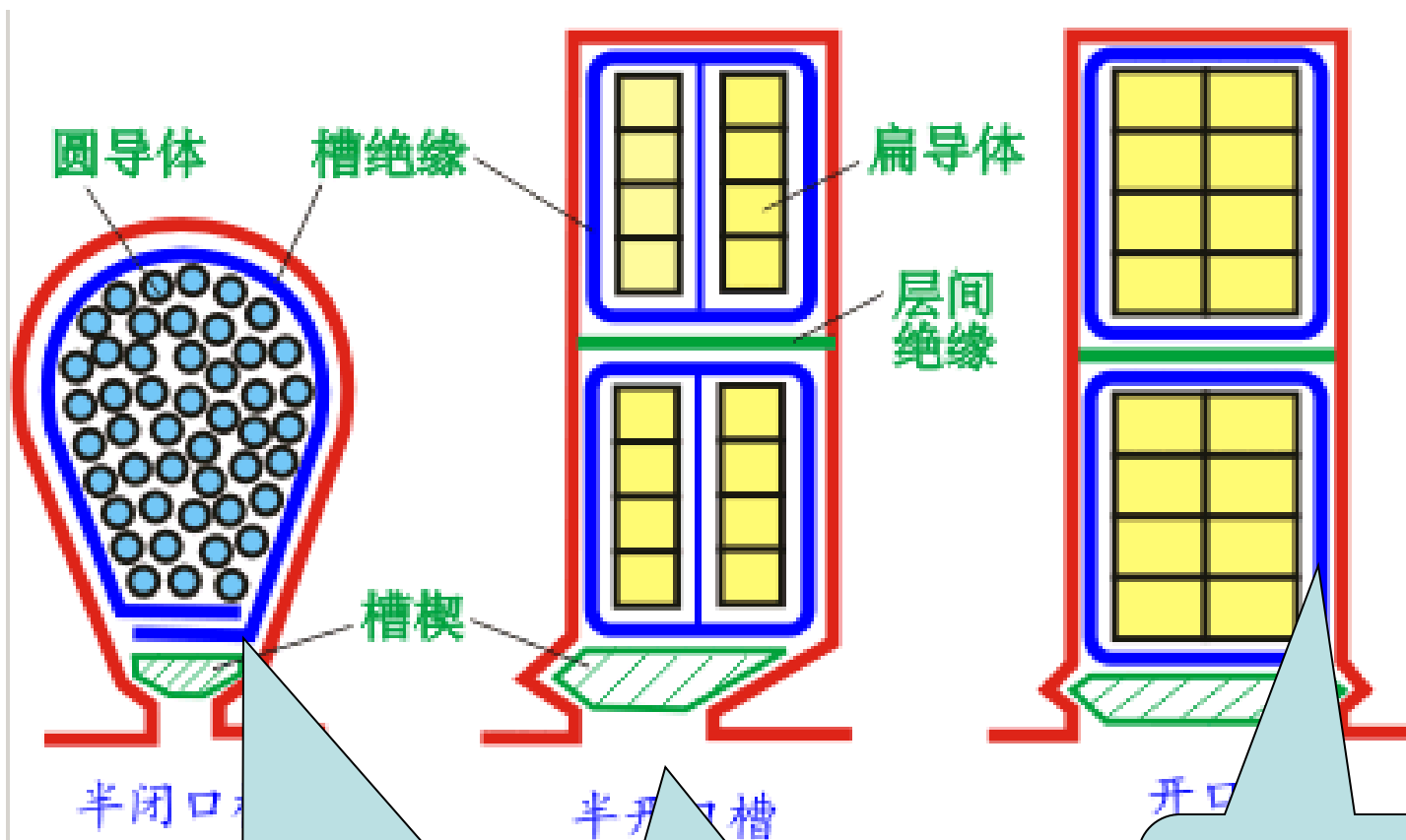
磁路部分，放置定子绕组。一般采用导磁性能良好和比损耗小的电工硅钢片叠成

为了嵌放定子绕组，在定子铁心内圆冲出许多形状相同的槽
定子槽（slot）





槽型



效率和功率因数较高
绕组嵌线工艺复杂
小容量及中型低压电机

可嵌放成型线圈
大型低压电动机

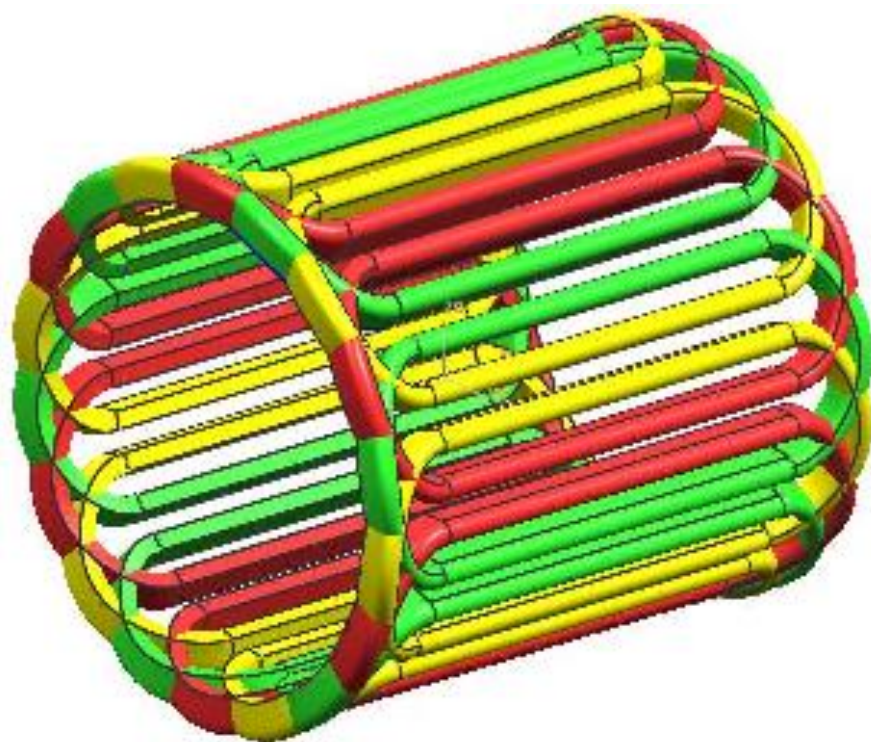
绝缘放置可靠、
绕组下线方便
高压电动机





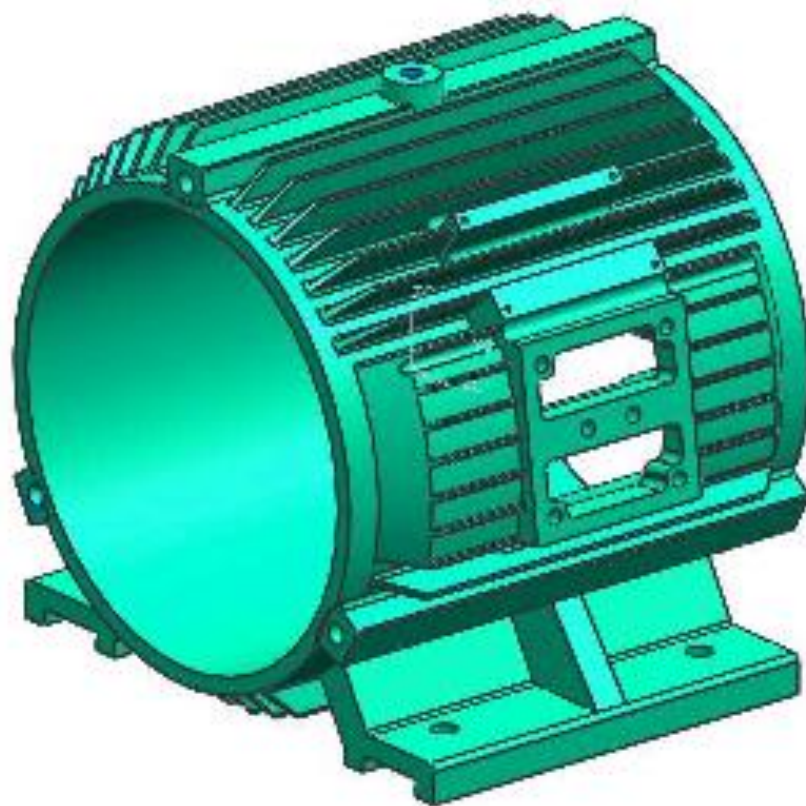
- 定子绕组 (stator winding)

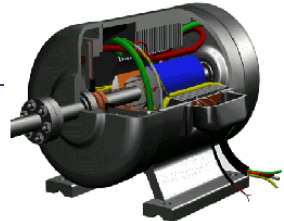
定子绕组通常应用双层短距绕组，小型电机可应用单层绕组。





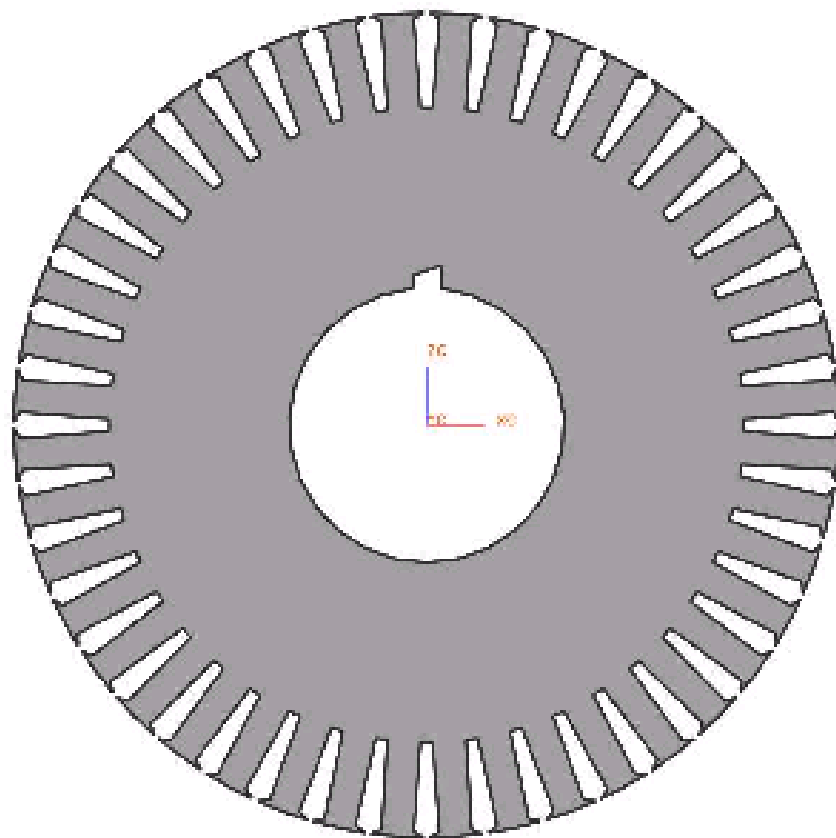
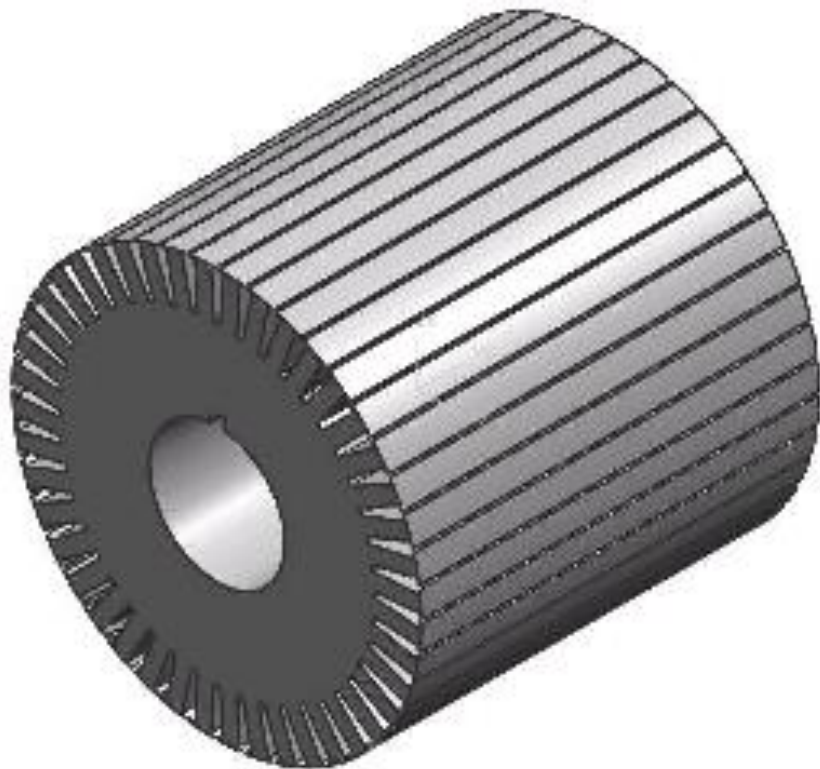
- 基座 (bracket)





转子：由铁芯、绕组和轴组成

- 转子铁芯（rotor core）



磁路，一般由硅钢片叠成。在转子铁心上开有槽，以供放置或浇注转子绕组。





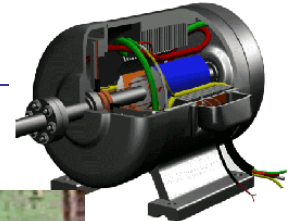
- 转子绕组 (rotor winding)

鼠笼式 squirrel-cage rotor

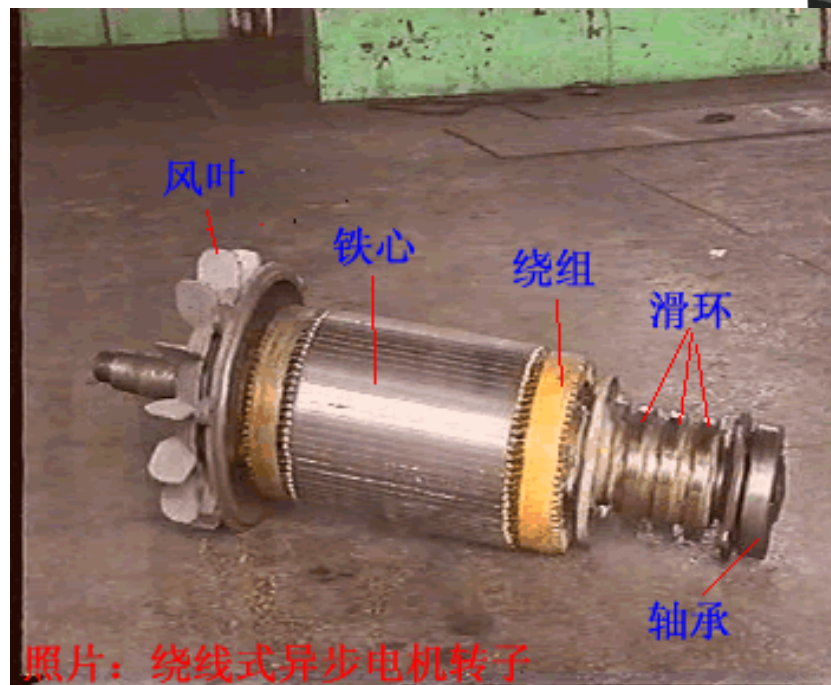


铸铝或焊接





绕线式 wound rotor



- 铁芯上绕有一对称绕组，和定子绕组有相同的极数，且制成相同的相数，连接成星形。
- 转子的一端装有三个集电环，各与转子绕组的三个起始端相连接。每个集电环上各有一电刷，通过电刷把转子绕组与外接变阻器相接。
- 安装变阻器的目的是改善起动特性(增加起动转矩，减小起动电流)或用以调节电动机的转速。





气隙 air gap: 定转子之间的空气隙

- 特点——气隙很小，在中、小型电机中，气隙一般为0.2-1.5毫米。
- 气隙大小对电机性能有很大的影响

气隙大：磁阻大，励磁电流（空载电流）大，功率因数低；
气隙磁场谐波含量（漏磁引起附加损耗）减少，改善启动性能。

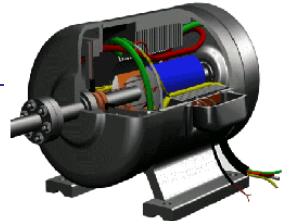
气隙小：励磁电流小，按加工可能及机械安全所限制。





铭牌 nameplate





异步电动机的额定值

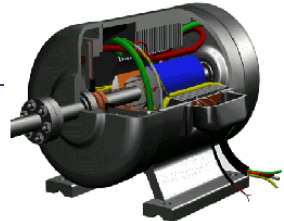
- 额定功率 P_N ，指电动机在额定方式下运行时，转轴上输出的机械功率（W或kW）。
- 额定电压 U_N ，指电动机在额定方式运行时定子绕组应加的线电压（V或kV）。
- 额定电流 I_N ，指电动机在额定电压和额定功率状态下运行时，流入定子绕组的额定线电流（A）。
- 额定频率 f ，我国工业频率为50HZ。
- 额定转速 n_N ，指在额定状态下运行时的转子转速（r / min）。

对三相电动机，额定功率：

$$P_N = \sqrt{3} U_N I_N \eta_N \cos \phi_N$$

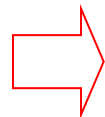
三相异步电动机的主要技术指标是指效率、功率因数、起动性能（堵转转矩、堵转电流和起动过程中的最小转矩）、最大转矩和噪声、振动。



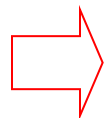


电磁物理过程

三相对称交流绕组通入三相对称交流电流时，将在电机气隙空间产生旋转磁场



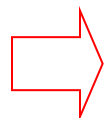
转子绕组的导体处于旋转磁场中，切割磁力线，产生感应电势（右手定则）



转子导体通过端环自成闭路，流过感应电流



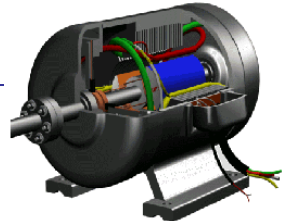
感应电流与旋转磁场相互作用产生电磁力（左手定则）



电磁力作用在转子上将产生电磁转矩

根据以上电磁感应原理，异步电动机也称为：
感应电机（induction machine）





转差率 (fractional slip)

- 在电动机状态，转子转速 n 总小于旋转磁场的同步转速 n_1 ，那么旋转磁场切割转子的相对转速为 $n_1 - n$ ，称为转差速度 (slip)
- 定义**转差率** s ——转差速度与同步转速的比值

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} * 100\%$$

- 转子绕组中的感应电势的大小与转差速度成正比，即与转差率成正比

按照转差率的大小与正负，异步电机可以分为电动机运行、发电机运行和电磁制动三种状态





电动机状态

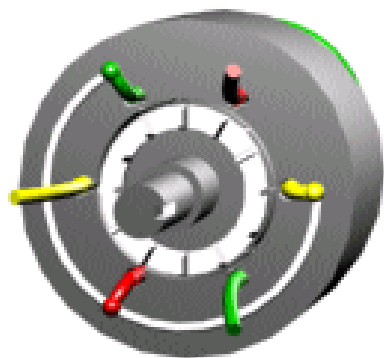


图1 异步机定转子

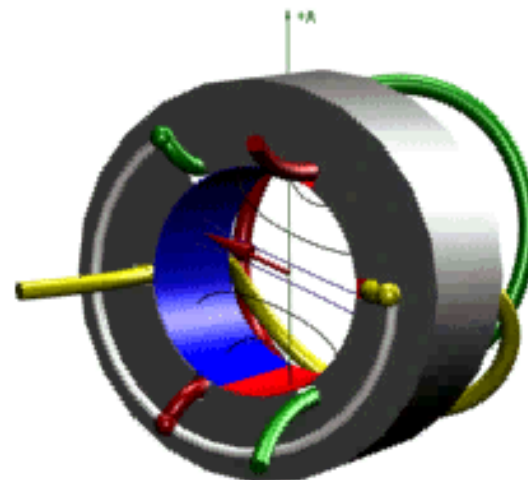


图2 异步机定子磁场

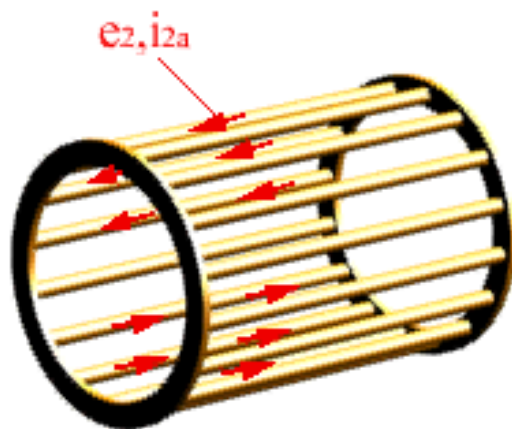


图3 启动时磁场切割静止转子

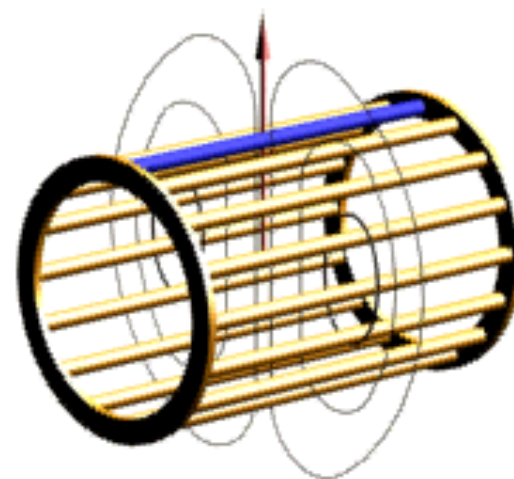
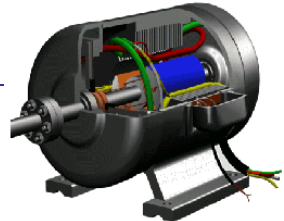


图4 运行时磁场转速大于转子转速

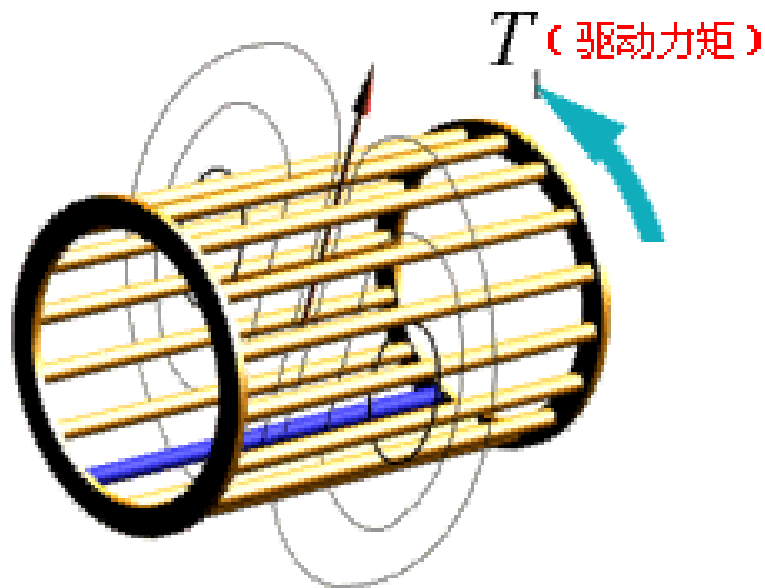
定子绕组从电源吸收能量，电磁力 F_e 对外做功，
负载力 F 为阻力， $0 < s < 1$





发电机状态

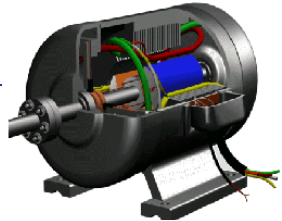
- 转子转速在外加力矩作用下，大于同步转速（同向）
- 与电动机时相比，转子的相对运行方向相反，那么转子导体中感应电势和电流的方向倒转
- 为使转子维持高于同步转速，外力 F 必须克服电磁力 F_e
- 输入机械功率，输出电功率，定子绕组向电源输出功率



异步发电状态：转子速大于旋转磁场转速

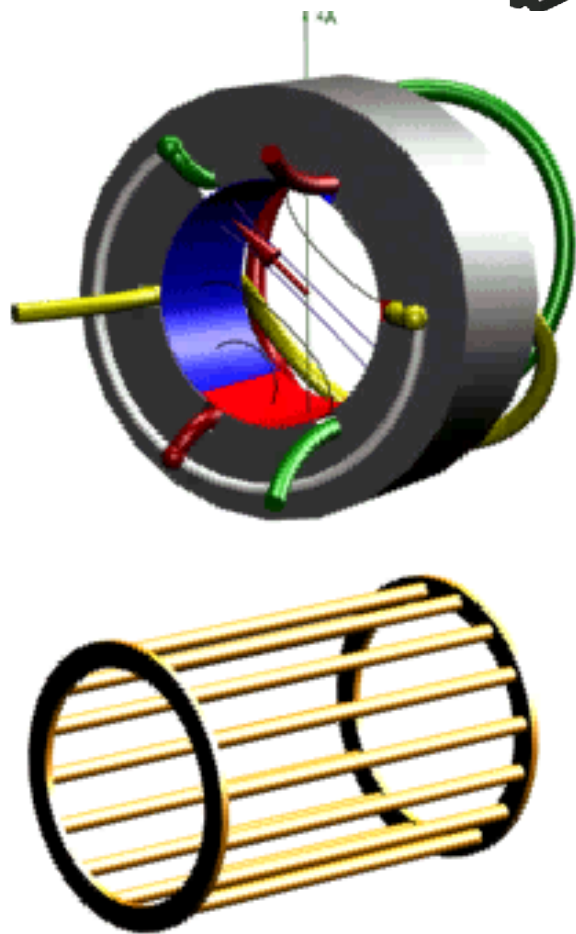
因为 $n > n_1$, 所以 $s < 0$





电磁制动状态

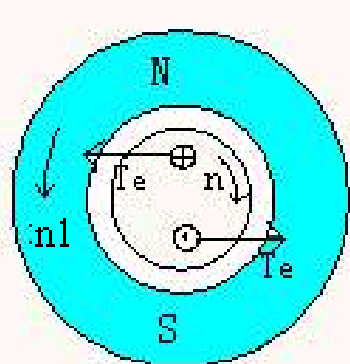
- 转子由外力拖动，与定子旋转磁场反向旋转，转子导体上的感应电流和电磁力矩方向与电动机运行时一致
- 定子绕组从电源吸收功率，外力供给机械功率，全部以损耗的方式在电机内部消耗
- 电磁力方向与外加力方向相反，起制动作用



转子转速与旋转磁场相反，所以 n 取负值， $s > 1$

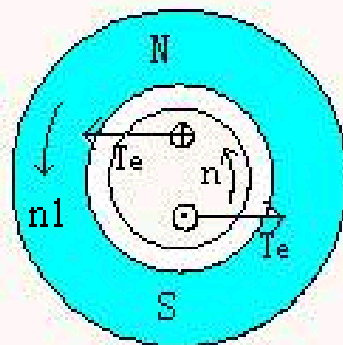


异步电机的运行状态和磁场



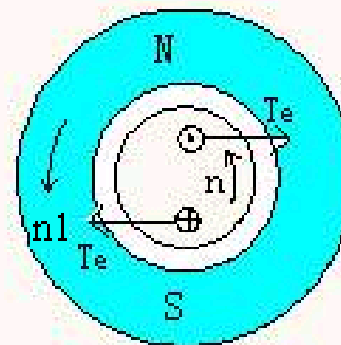
$$s > 1$$

$n < 0$
电磁制动



$$0 < s < 1$$

$n < n_1$
电动机



$$s < 0$$

$n > n_1$
发电机

- 电网**输入**电能到电机
- 外界**输入**机械能到电机
- 输入到电机中的能量全部被消耗

- 电网**输入**电能到电机
- 电机转子**输出**机械能

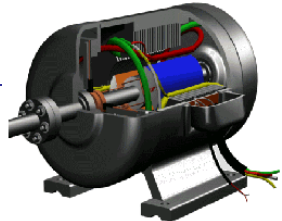
- 电机**输出**电能
- 原动机**输入**机械能到电机

旋转磁场与电磁力矩同向——电网输入电能

转子转向与电磁力矩同向——向外界输出机械能



东南大学
电气工程学院



异步电机的磁场

定子电流产生的旋转磁场转速为： $n_1 = \frac{60f_1}{p}$

➤空载时，转子电流近似为0，气隙中仅有定子电流产生的磁场

➤负载时，转速下降，定子电流增大，转子电流也增大，将产生转子磁势并建立转子磁场。若转子转速为 n ，那么转子感应电流的频率为：

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n)}{60} = \frac{pn_1}{60} \times \frac{n_1 - n}{n}$$

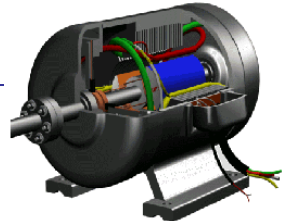
转子电流产生的旋转磁势相对与转子的转速为：

$$n_2 = \frac{60f_2}{p} = \frac{60sf_1}{p} = sn_1 = n_1 - n$$

转子电流产生的旋转磁场相对定子的转速为：

$$n_2 + n = n_1 - n + n = n_1$$

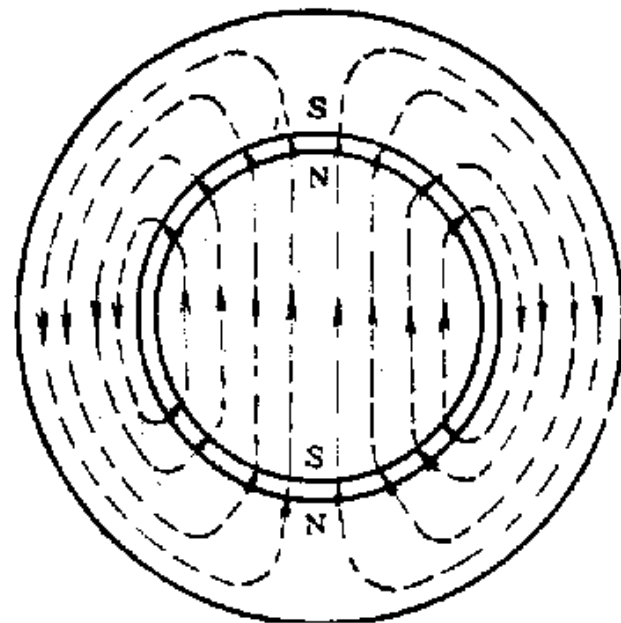




$$\Phi_m$$

主磁通 (main flux, mutual flux)

- 由基波磁势产生，是**每极的基波磁通量**。
- 交链定子绕组与转子绕组，实现能量的传递。
- 以同步速旋转
- 主磁通途经五段磁路：空气隙、定子齿、转子齿、定子轭和转子轭。（路径）



两极机主磁通分布情况

气隙 ⇨ 定子齿 ⇨ 定子轭

⇨ 定子齿 ⇨ 气隙 ⇨ 转子齿

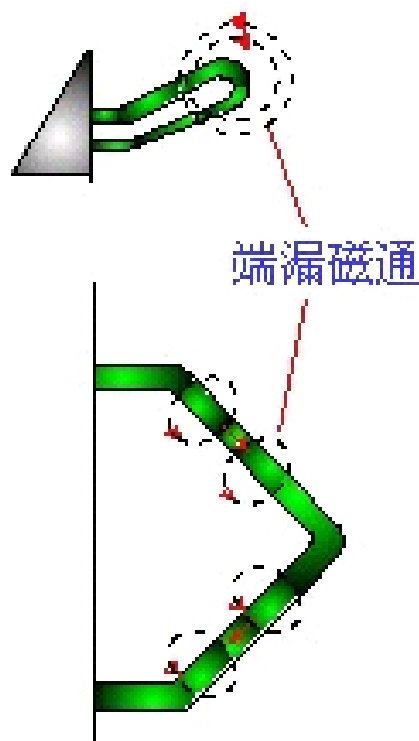
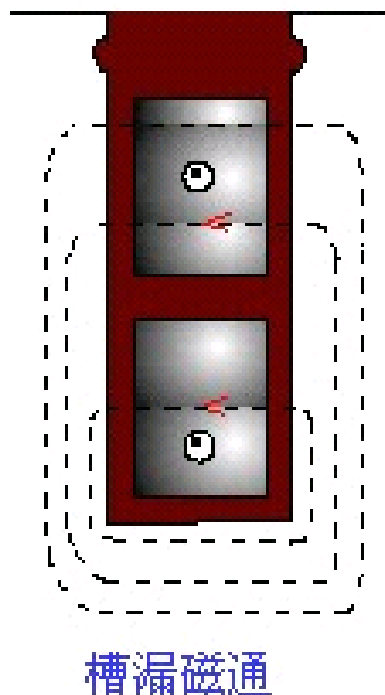
⇨ 转子轭 ⇨ 转子齿 ⇨ 气隙

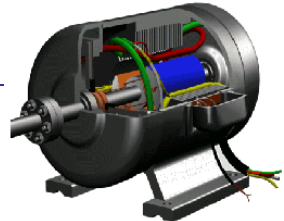




漏磁通 (leakage flux) Φ_{σ}

- 除去主磁通以外的磁通。
- 包含三个部分：槽漏磁通、端部漏磁通和谐波漏磁通（按路径区分）。
- 槽漏磁通和端部漏磁通。仅只交链定子绕组，与转子绕组没有互感作用，不传递能量。



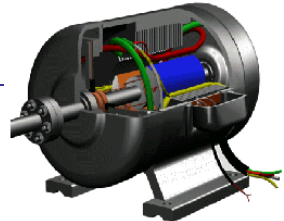


- 谐波漏磁通——由高次谐波磁势所产生的谐波磁通，穿过空气隙，交链转子绕组，会在定子绕组和转子绕组中感应电势
- 谐波磁场极对数 $p_v = \nu p$ ， 旋转速度 $n_v = \frac{n_1}{\nu}$
- 在定子绕组上的感应电势

$$f_{1\nu} = \frac{p_v n_v}{60} = \frac{p n_1}{60} = f_1$$

频率仍为基波频率，与其它定子漏磁通感应的电势频率一样，归为定子漏磁通。





- 谐波磁场在转子绕组的感应电势

$$f_{2v} = \frac{p_v(n_v - n)}{60} = \frac{vp\left(\frac{n_1}{v} - n\right)}{60}$$

- 基波磁场在转子绕组中感应电势频率为

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n)}{60}$$

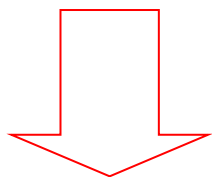
两者频率不同，要把基波磁通和谐波磁通分开考虑

转子电流也将产生漏磁通，包括转子的槽漏磁通、端部漏磁通和谐波漏磁通



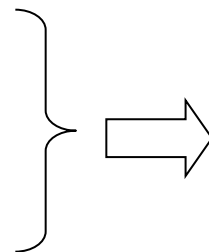


转子不动

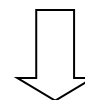


转子转动

电压平衡
磁势平衡



基本方程式

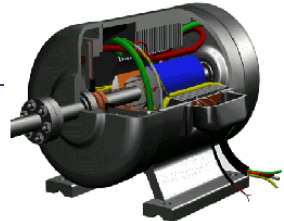


等效电路



相量图





转子不动时的异步电机

➤ 电磁过程

将异步电动机转轴卡住，转子绕组短路，在定子方施加一三相对称的低电压，此时异步电动机的运行称为转子静止时的运行，也称为堵转试验或短路试验（相当于变压器做短路实验）。

分析前提：

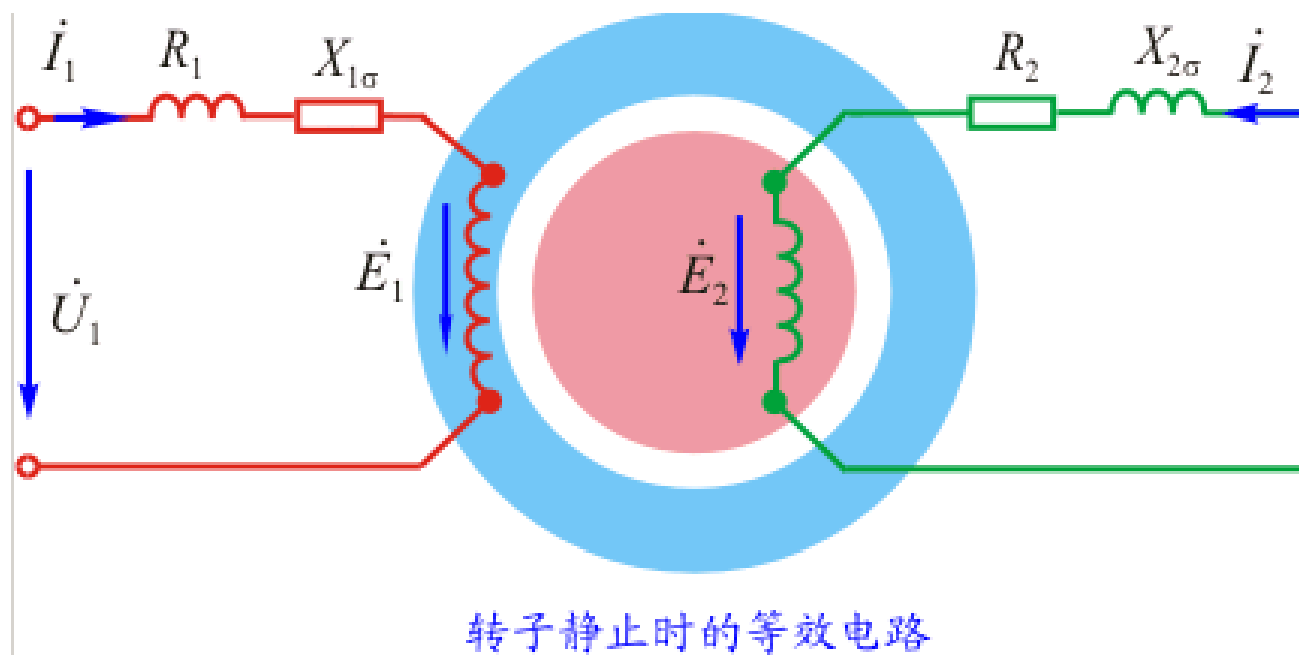
- 把异步电机的磁通分成主磁通和漏磁通，并把谐波磁通归并到漏磁通
- 假设：气隙中只有基波磁通，定、转子绕组上只感应有基波电势
- 漏磁感应电势用漏抗压降表示





►电压平衡

异步电机转子绕组是短路的，从电路分析角度来看，与次级侧短路时的变压器类似。

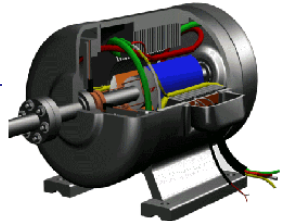


$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(r_1 + jx_1)$$

$$0 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2(r_2 + jx_2)$$

以下标1和2区别定子和转子电路的各物理量，**各种数量均取每相值。**





➤ 磁势平衡

- 转子绕组是一对称多相绕组，与定子绕组有相同极数。
- 绕线式转子有明显的相数和极对数，设计转子绕组时，必须使转子极数等于定子极数。否则，没有平均电磁转矩。
- 鼠笼转子的转子有鼠笼加端环组成。所有导条在两头被端环短路，整个结构是对称的，实质上是一个对称的多相绕组。**鼠笼转子的极数恒等于定子绕组的极数**





- 在转子不动时，定、转子电势有相同频率，由转子电流所产生的基波旋转磁势与由定子电流所产生的基波旋转磁势有相同转速，没有相对运动。
- 转子旋转磁势对定子旋转磁势产生去磁作用，二者共同作用在主磁路中产生主磁通，决定于定子电势 E_1

$$E_1 = 4.44 f_1 N_1 k_{w1} \Phi_m$$

- E_1 受到定子电压平衡支配，决定了基波磁通 Φ_m ，从而决定了激磁电流 I_m 。





- 当转子有电流时，定子电流应包含两个分量

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_m + \dot{I}_{1L}$$

- 由定子电流所产生的磁势也包含两个分量

$$\dot{F}_1 = \dot{F}_m + \dot{F}_{1L}$$

- 第一项用以产生基波磁通；第二项为负载分量，用以抵消转子磁势去磁作用，它与转子磁势大小相等方向相反

与变压器中的分析方法一致





- 设定子绕组有 m_1 相，磁势的振幅

$$F_1 = \frac{m_1}{2} * 0.9 * \frac{N_1 k_{w1}}{p} I_1$$

- 转子绕组有 m_2 相，磁势振幅

$$F_2 = \frac{m_2}{2} * 0.9 * \frac{N_2 k_{w2}}{p} I_2$$

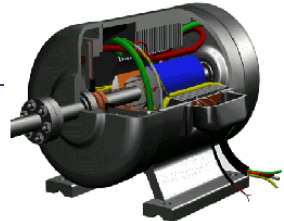
- 激磁磁势

$$F_m = \frac{m_1}{2} * 0.9 * \frac{N_1 k_{w1}}{p} I_m$$

- 磁势平衡式

$$\frac{m_1}{2} * 0.9 * \frac{N_1 k_{w1}}{p} I_m = \frac{m_1}{2} * 0.9 * \frac{N_1 k_{w1}}{p} I_1 + \frac{m_2}{2} * 0.9 * \frac{N_2 k_{w2}}{p} I_2$$





➤ 绕组归算

- 转子绕组的归算——把实际相数为 m_2 、绕组匝数为 N_2 、绕组系数为 k_{w2} 的转子绕组，归算成与定子绕组有相同相数、相同匝数和相同绕组系数的转子绕组。
- 在进行归算时，有电压变比、电流变比和阻抗变比。

✓ 电流的归算

根据归算前后转子磁势应保持不变为条件

$$\frac{m_1}{2} * 0.9 * \frac{N_1 k_{w1}}{p} I'_2 = \frac{m_2}{2} * 0.9 * \frac{N_2 k_{w2}}{p} I_2$$

✓ 电势的归算

根据归算前后转子视在功率保持不变为条件

$$m_1 E'_2 I'_2 = m_2 E_2 I_2$$





✓ 阻抗的归算

根据归算前后转子上的铜耗保持不变为条件

$$m_1 I_2'^2 r_2' = m_2 I_2^2 r_2$$

归算前后转子功率因数保持不变

$$\tan \theta_2 = \frac{x_2}{r_2} = \frac{x_2'}{r_2'}$$

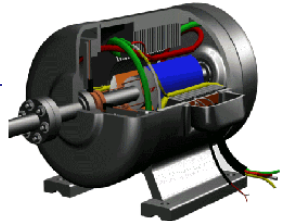
$$I_2' = \frac{m_2 N_2 k_{w2}}{m_1 N_1 k_{w1}} I_2 = \frac{I_2}{k_i} \quad \text{--- 电流变比}$$

$$E_2' = \frac{N_1 k_{w1}}{N_2 k_{w2}} E_2 = k_e E_2 \quad \text{--- 电压变比}$$

阻抗变比 $k_e k_i$



三相异步电机的等效电路



基本方程组:

转子各物理量的折算

折算后的方程式组

$$\dot{E}'_2 = k_e \dot{E}_2$$

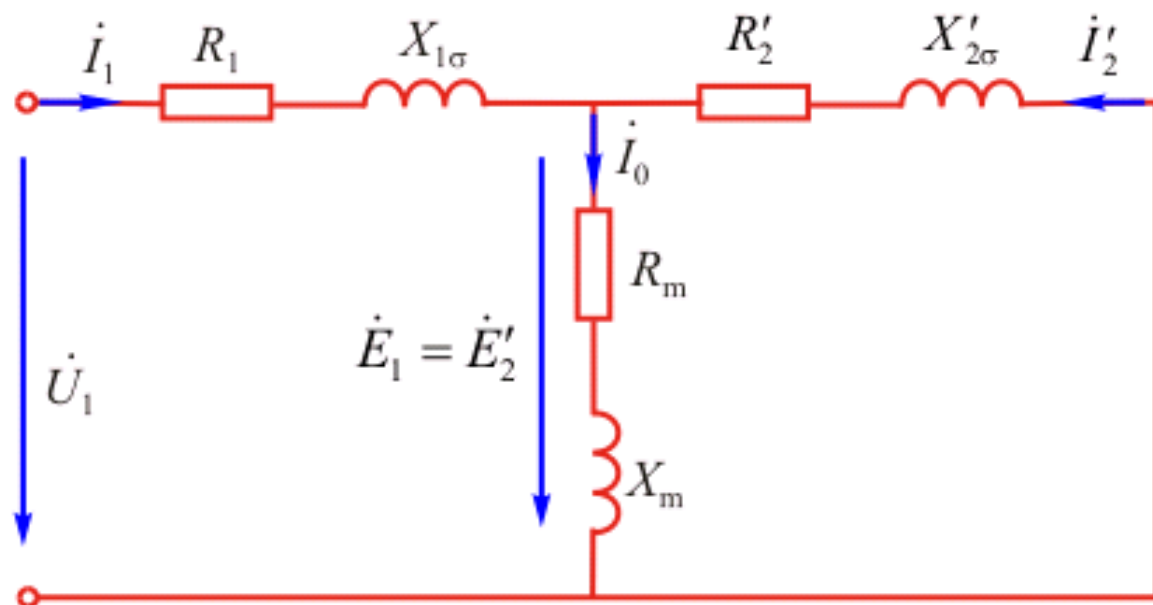
$$\dot{I}'_2 = \frac{\dot{I}_2}{k_i}$$

$$R'_2 = k_e k_i R_2$$

$$X'_2 = k_e k_i X_2$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \\ \dot{E}'_2 &= \dot{I}'_2 (R'_2 + jX'_2) \\ \dot{E}_1 &= \dot{E}'_2 \\ \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 &= \dot{I}_0 \\ -\dot{E}_1 &= \dot{I}_0 Z_m \end{aligned} \right\}$$

等效电路:



转子静止时异步电机的T型等效电路



参数的含义

- r_m ——铁耗等效电阻core loss resistance
- x_m ——magnetizing reactance定子每相绕组与主磁通对应的电抗，随铁芯的饱和不同而变化。

异步电机中，磁通由三相联合产生

变压器中，磁通由一相绕组产生

- x_1 ——定子漏抗，由定子三相电流联合产生的漏磁通，在定子每一相上引起的电抗。





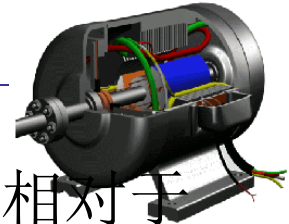
转子转动时的异步电机

转子旋转对转子各物理量的影响

- 转子转动后，转子绕组的电势和电流的频率与转子的转速有关——取决于气隙旋转磁场与转子的相对速度。
- 转子电势和电流的频率（转子频率，与转差率成正比，又称为转差频率）为

$$f_2 = p \frac{n_1 - n}{60} = \frac{n_1 - n}{n_1} p \frac{n_1}{60} = s f_1$$





- 转子转动后，由转子电流所产生的转子基波旋转磁势相对于转子的转速为

$$n_2 = \frac{60f_2}{p} = \frac{60sf_1}{p} = sn_1$$

- 转子基波旋转磁势相对于定子的转速为

$$n_2 + n = sn_1 + n = n_1$$

- 由转子电流所产生的转子基波旋转磁势和由定子电流所产生的定子基波旋转磁势没有相对运动。（磁势平衡式不变）





转子转动后的基本方程式

$$E_{2s} = 4.44 f_2 N_2 k_{w2} \Phi_m = 4.44 s f_1 N_2 k_{w2} \Phi_m = s E_2$$

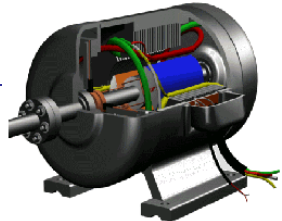
$$x_{2s} = 2\pi f_2 L_{\sigma 2} = 2\pi s f_1 L_{\sigma 2} = s x_2$$

电压平衡式

$$0 = \dot{E}_{2s} - \dot{I}_2 (r_2 + jx_{2s}) \quad \text{频率 } f_2 = s f_1$$

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 (r_1 + jx_1) \quad \text{频率 } f_1$$



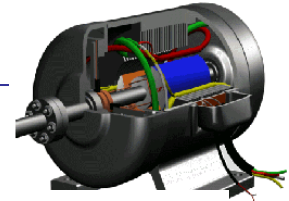


不同频率的物理量所列出的方程式是不能联立求解，应把转子频率变换成与定子电路相同的频率——**频率归算**

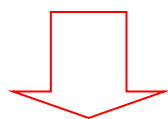
- 用一等效的转子电路替代实际转动的转子电路，使与定子电路有相同频率。（**转子静止**）

- **保持频率归算后的转子电流的大小和相位不变**，保持磁势平衡不变，保持定子电流的大小和相位不变。保持损耗和功率不变。

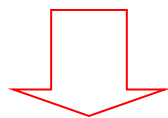




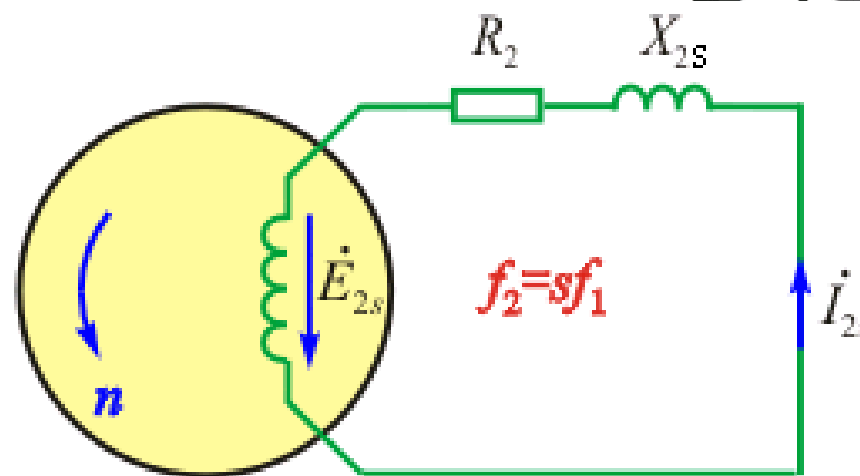
$$0 = \dot{E}_{2s} - \dot{I}_2(r_2 + jx_{2s})$$



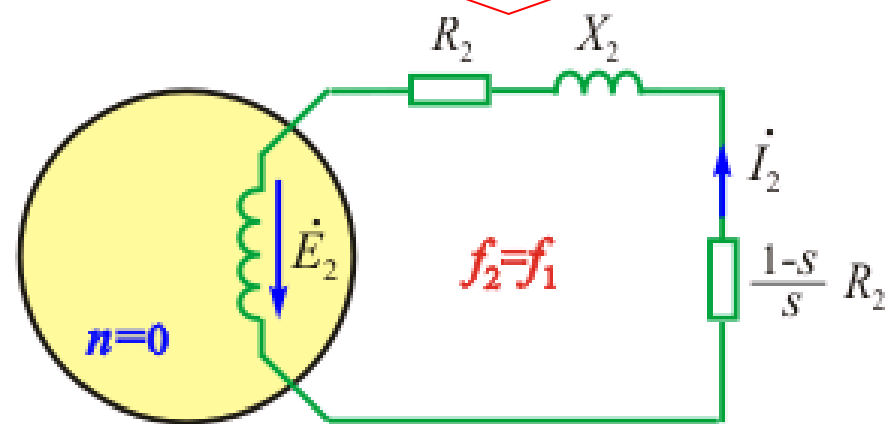
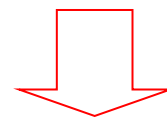
$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_{2s}}{r_2 + jx_{2s}} = \frac{s\dot{E}_2}{r_2 + jsx_2}$$



$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2}{\frac{r_2}{s} + jx_2} = \frac{\dot{E}_2}{(r_2 + r_2 \frac{1-s}{s}) + jx_2}$$



(a) 旋转转子



(b) 静止转子





电阻 $r_2 \frac{1-s}{s}$ 的物理意义

- 在实际转动的电机中，在转子回路中并无此项电阻，但有机械功率输出。
- 在频率归算后的转子电路中，因已等效成静止转子，没有机械功率输出，但却串入附加电阻 $r_2 \frac{1-s}{s}$ ，其电功率为 $I_2^2 r_2 \frac{1-s}{s}$
- 电功率 $m_2 I_2^2 r_2 \frac{1-s}{s}$ 模拟轴上的机械功率。





进一步讨论

- 不论静止或者旋转的转子，其转子磁势总以同步转速旋转，即转子磁势的转速不变，大小相位又没有变，故电机的磁势平衡依然维持。
- 静止的转子不再输出机械功率，即电机的功率平衡中少了一大块机械功率。
- 静止的转子中多了一个附加电阻，而电流有没有变，所以多了一个电阻功率。
- 分析证明：附加电阻上消耗的电功率等于电机输出的机械功率





基本方程组:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(r_1 + jx_1)$$

$$0 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 \left(\frac{r'_2}{s} + jx'_2 \right)$$

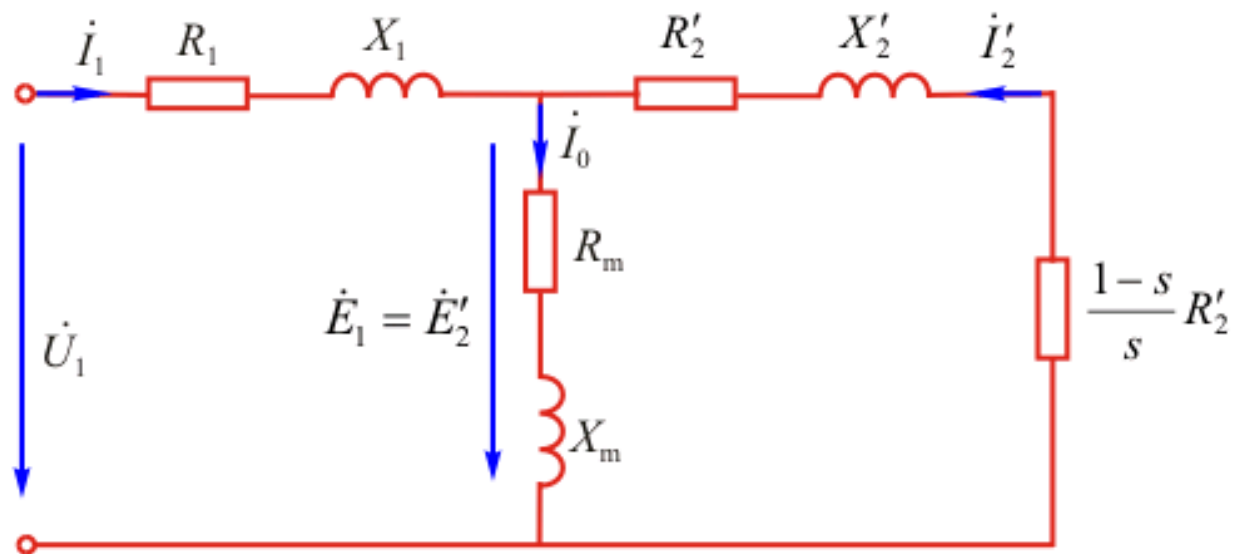
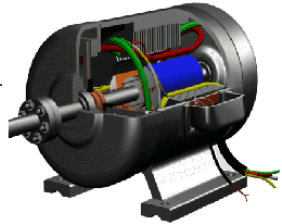
$$\dot{I}_1 = \dot{I}_m + (-\dot{I}'_2)$$

$$\dot{E}_1 = \dot{E}'_2$$

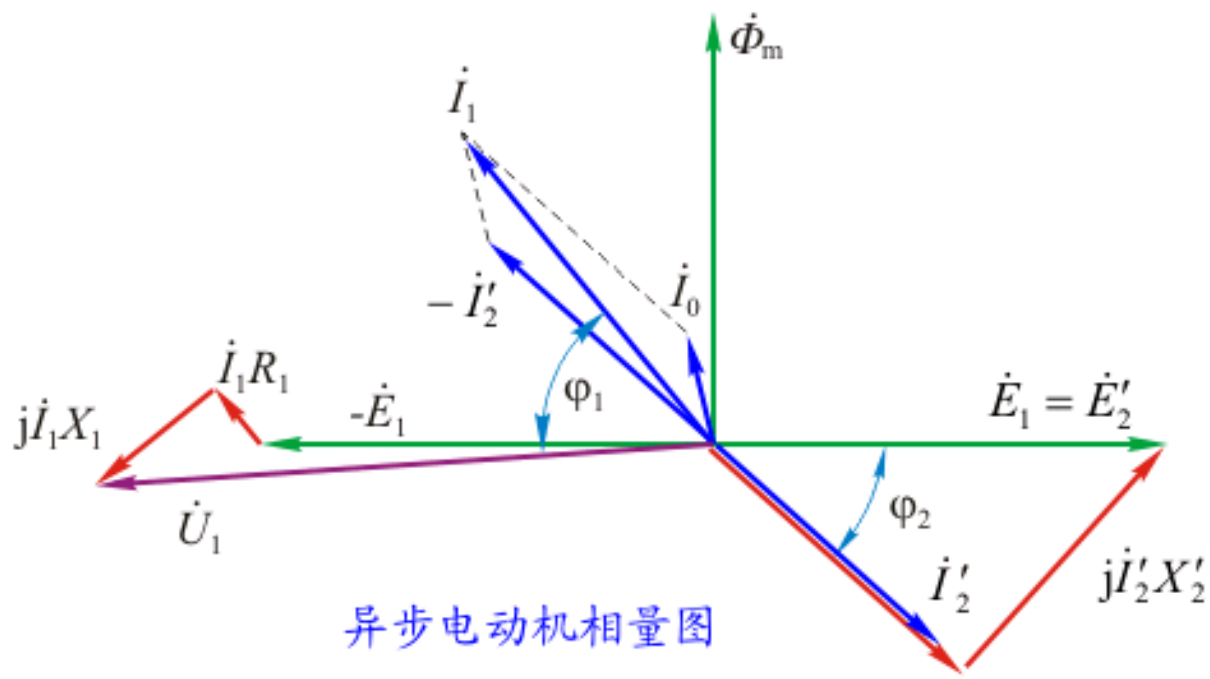
$$-\dot{E}_1 = \dot{I}_m Z_m = \dot{I}_m (r_m + jx_m)$$



三相异步电机的等效电路

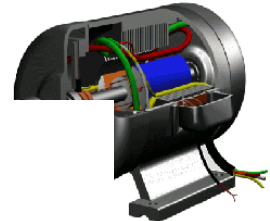


异步电机的T型等效电路



异步电动机相量图





空载:

转速接近同步速, $s \rightarrow 0$, 附加电阻 $\rightarrow \infty$, 转子处于开路;
功率因数滞后, 且很小。

额定负载:

$s_N = 5\%$, 附加电阻为 $19r'_2$, 转子回路接近电阻性;
功率因数较高 (0.8-0.85) 滞后。

启动开始:

转子处于堵转, $s = 1$, 附加电阻 = 0, 转子回路处于短路;
启动电流很大, 功率因数滞后, 且较小。

发电机状态:

转速大于同步速, $s < 0$, 附加电阻 < 0 , 表明机械功率为负;
输入机械功率——发电机。

电磁制动状态:

转向与磁场同步速相反, $s > 1$, 机械功率 < 0 , 吸收机械功率。
同时吸收电功率, 对机械运行起制动作用。



基本参数: $r_1, x_1, r_2, x_2, r_m, x_m$ 运行参数: s

空载试验 No-load test

- 试验条件

额定电源频率 f_1

转子空载, 相当于等效电路转子侧开路

额定电压 U_N

- 测量

激磁电流 (exciting current) i_0

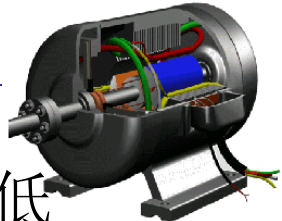
空载损耗 (no-load losses) p_0

- 计算

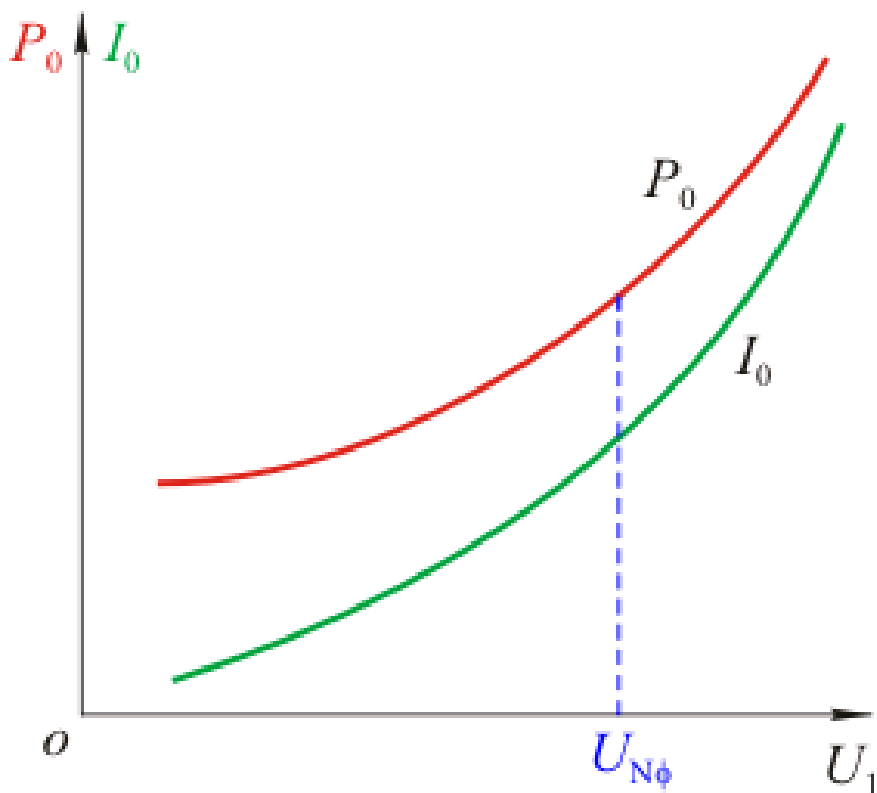
激磁参数 r_m 、 x_m

铁耗 p_{Fe} 和机械耗 p_{mec}





试验方法: 试验时电机轴上不带负载，用三相调压器对电机供电，使定子端电压从 $(1.1 \sim 1.3) U_N$ 开始，逐渐降低电压、空载电流逐渐减少，直到电动机转速发生明显变化、空载电流明显回升为止。在这个过程中，记录电动机的端电压 U_1 、空载电流 I_0 、空载损耗 P_0 、转速 n 并绘制空载特性曲线如图所示。



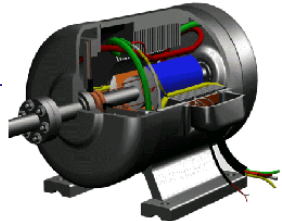
由于异步电动机空载运行时转子电流小，转子铜耗可以忽略不计

$$P_0 = m_1 I_0^2 R_1 + p_{Fe} + p_{mec}$$

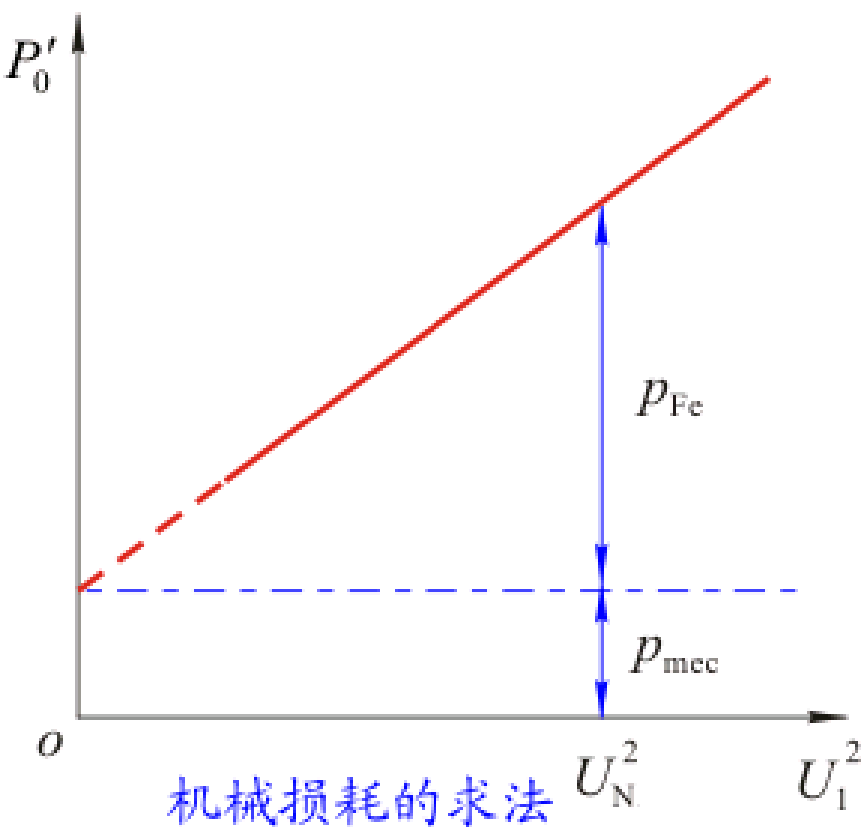
$$P'_0 = P_0 - m_1 I_0^2 R_1 = p_{Fe} + p_{mec}$$

异步电机的空载实验曲线





损耗分离: 在 P'_0 的三项损耗中, 机械损耗 p_{mec} 与电压 U_1 无关, 在电动机转速变化不大时, 可以认为是常数。 p_{Fe} 可以近似认为与磁密的平方成正比, 因而可近似认为与电压的平方成正比。故 P'_0 与 U_1^2 的关系曲线近似为一直线, 如图所示, 其延长线与纵轴交点即为机械损耗 p_{mec} 。



$$r_m = \frac{p_{Fe}}{m_1 I_0^2}$$

$$x_0 = x_1 + x_m = \sqrt{\frac{U_1^2}{I_0^2} - r_0^2} \approx \frac{U_1}{I_0}$$





短路试验 Blocked-rotor test

- 试验条件

额定电源频率 f_1

转子堵转，相当于等效电路转子侧短路

额定电流 $I_k = I_N$

- 测量

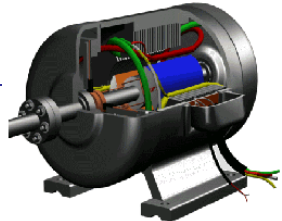
电压 U_k

短路损耗 (blocked-rotor losses) p_k

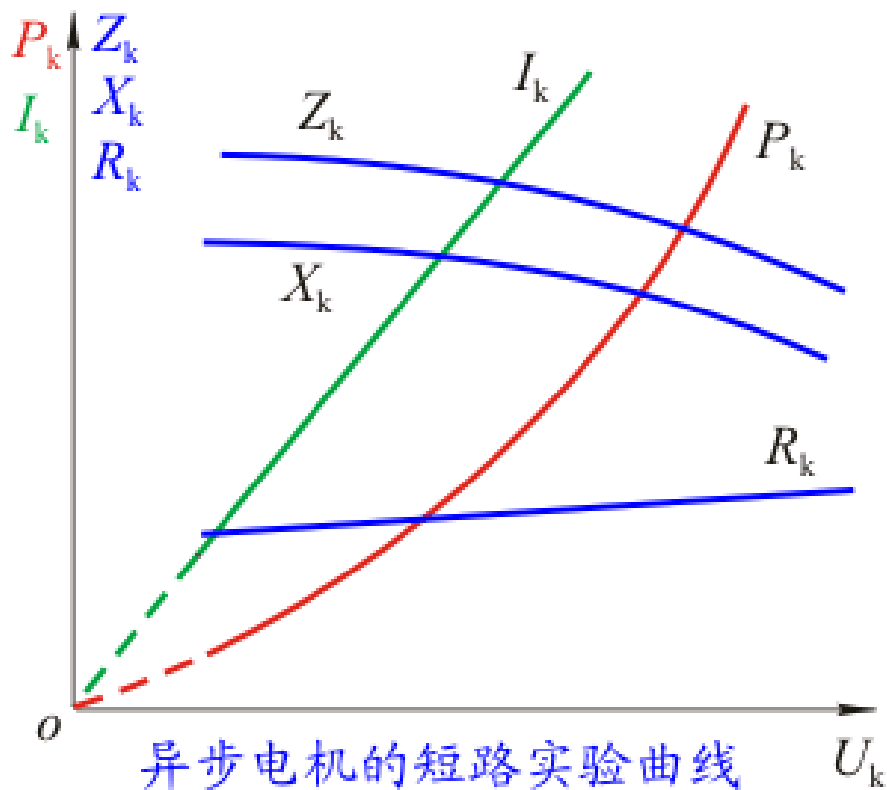
- 计算

短路参数 $r_1 + r_2'$ 、 $x_1 + x_2'$





试验方法: 将转子堵住，在定子端施加电压，从 $0.4U_N$ 开始逐渐降低，记录定子绕组端电压 U_k 、定子电流 I_k 、定子端输入功率 P_k ，作出异步电机的短路特性 $I_k = f(U_k)$ ， $P_k = f(U_k)$ ，如图所示。根据短路特性曲线，取额定电流点的 U_k (相电压)、 I_k (相电流)、 P_k



短路时，定子端的等效输入阻抗

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k} \quad r_k = \frac{P_k}{m_1 I_k^2} \quad x_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2}$$

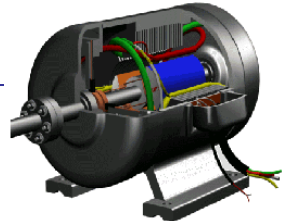
由等效电路

$$r_k = r_1 + r_2' \frac{x_m^2}{r_2'^2 + j(x_m + x_2')^2}$$

$$x_k = x_1 + x_m \frac{r_2'^2 + x_2'(x_m + x_2')}{r_2'^2 + j(x_m + x_2')^2}$$

短路电压低，
铁耗可不计，
 $r_m = 0$





异步电机等效电路的简化

- 变压器：

激磁阻抗大， $r_m=1-5$, $x_m=10-50$

漏抗小，约为0.014-0.08

- 异步电机：

存在气隙，激磁阻抗较小，标么值 $r_m=0.08-0.35$, $x_m=2-5$

漏抗较大， x_1, x_2 约为0.07-0.15

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1(Z_1 + Z_m) + \dot{I}_2' Z_m$$

$$\dot{I}_2' Z_{2s}' + (\dot{I}_1 + \dot{I}_2') Z_m = 0$$

$$\dot{I}_1 = \dot{U}_1 \frac{1 + \frac{Z_{2s}'}{Z_m}}{Z_1 + \left(1 + \frac{Z_1}{Z_m}\right) Z_{2s}'} = \dot{U}_1 \frac{1 + \frac{Z_{2s}'}{Z_m}}{Z_1 + \dot{C}_1 Z_{2s}'}$$

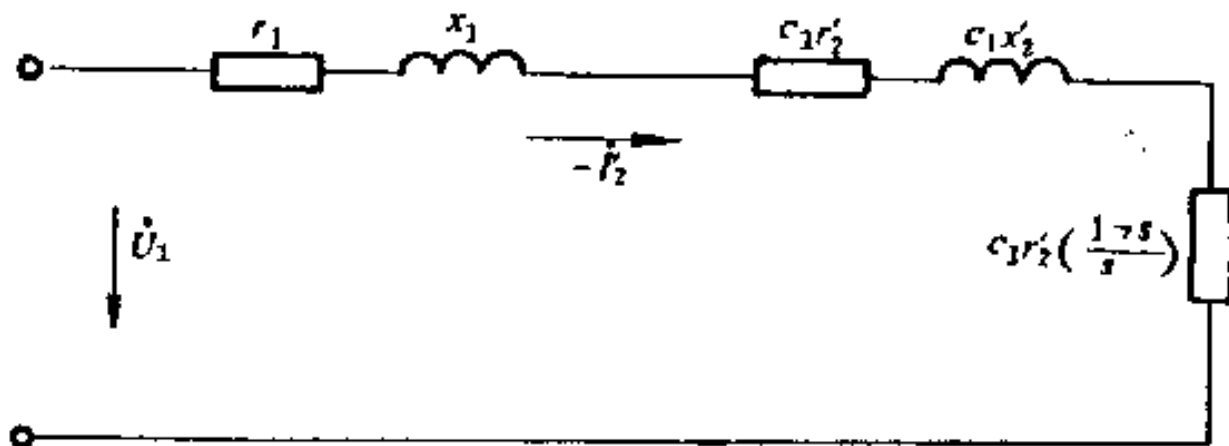
$$-\dot{I}_2' = \dot{U}_1 \frac{1}{Z_1 + \left(1 + \frac{Z_1}{Z_m}\right) Z_{2s}'} = \dot{U}_1 \frac{1}{Z_1 + \dot{C}_1 Z_{2s}'}$$





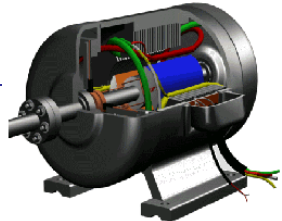
近似计算转子电流

$$c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_m} \quad -I_2' = \frac{\dot{U}_1}{\left(r_1 + c_1 \frac{r_2'}{s} \right) + j(x_1 + c_1 x_2')}$$



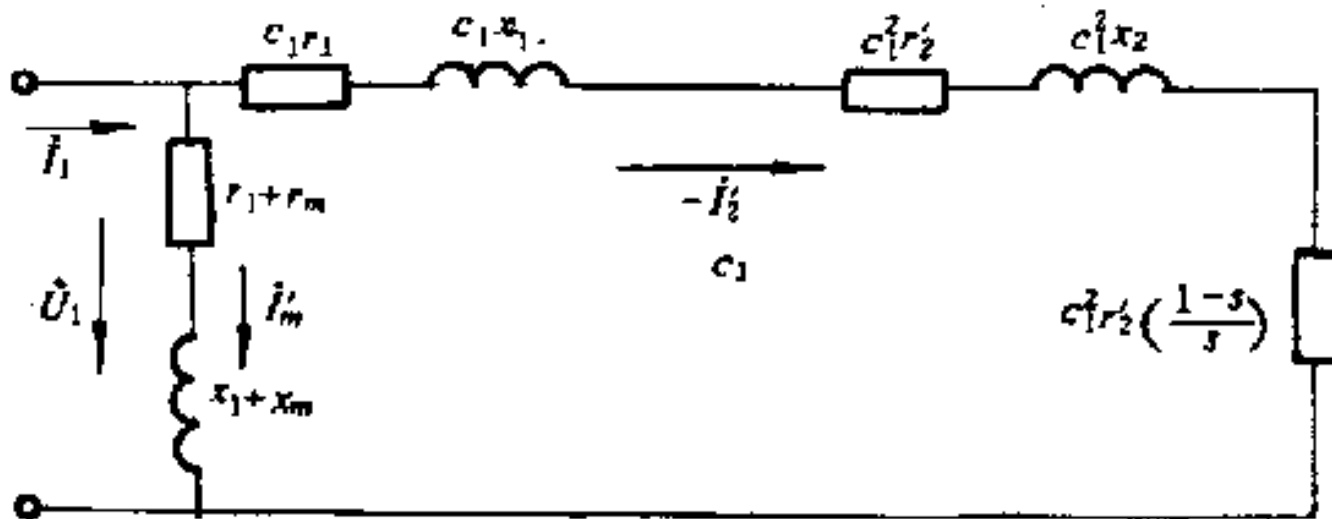
求转子电流的较准确近似等效电路





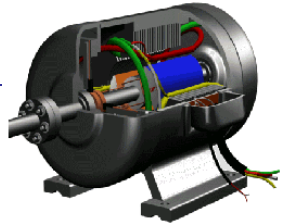
近似计算定子电流

$$\begin{aligned}\dot{I}_1 &= \frac{\dot{U}_1}{Z_1 + Z_m} + \frac{\dot{U}_1}{c_1 Z_1 + c_1^2 Z_{2s}'} \\ &= \frac{\dot{U}_1}{(r_1 + r_m) + j(x_1 + x_m)} + \frac{\dot{U}_1}{\left(c_1 r_1 + c_1^2 \frac{r_2'}{s}\right) + j(c_1 x_1 + c_1^2 x_2')} \\ &= \dot{I}_m' + \left(-\frac{\dot{I}_2'}{c_1}\right)\end{aligned}$$



求定子电流的较准确近似等效电路



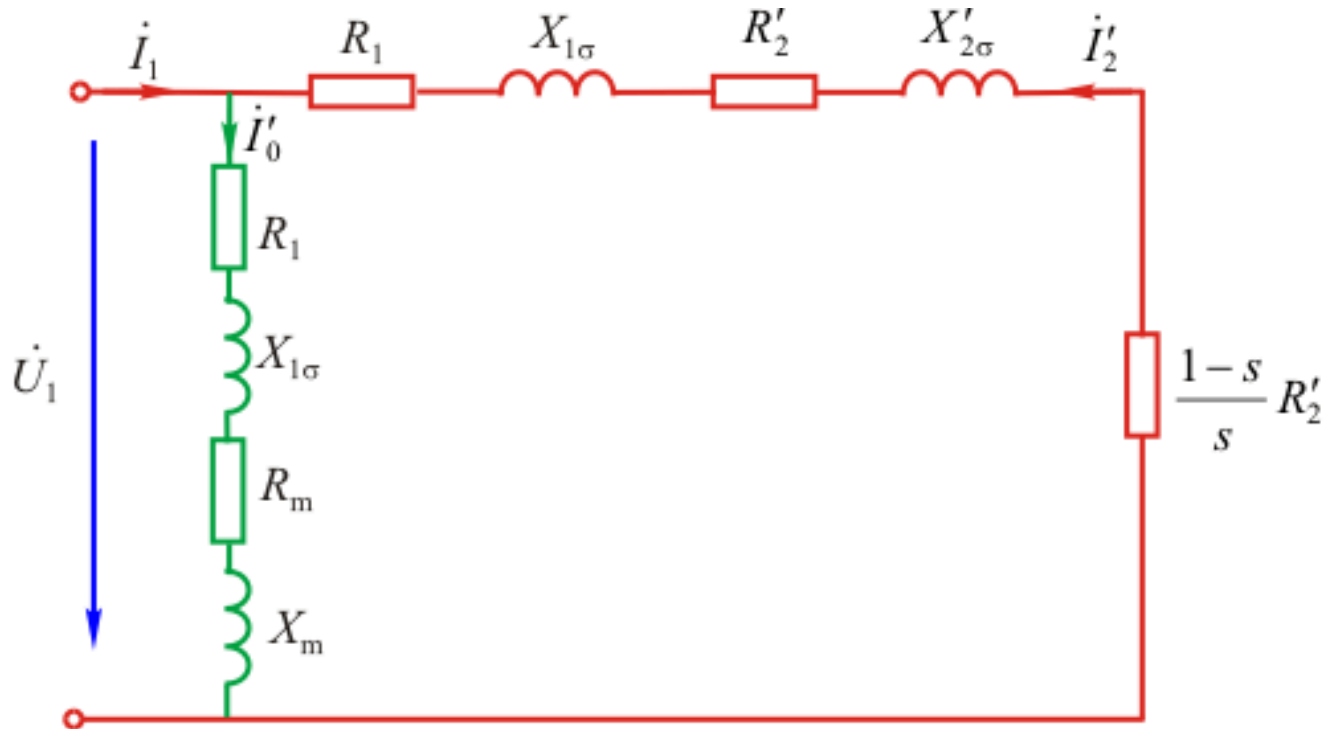


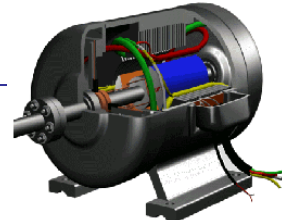
简化等效电路

较大容量电机, $x_m \gg x_1$, $c \approx 1$ 。

$$-\dot{I}'_2 = \frac{\dot{U}_1}{\left(r_1 + c_1 \frac{r'_2}{s} \right) + j(x_1 + c_1 x'_2)} = \frac{\dot{U}_1}{\left(r_1 + \frac{r'_2}{s} \right) + j(x_1 + x'_2)}$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{(r_1 + r_m) + j(x_1 + x_m)} + \left(-\frac{\dot{I}'_2}{c_1} \right) = \frac{\dot{U}_1}{(r_1 + r_m) + j(x_1 + x_m)} + \dot{I}'_2$$

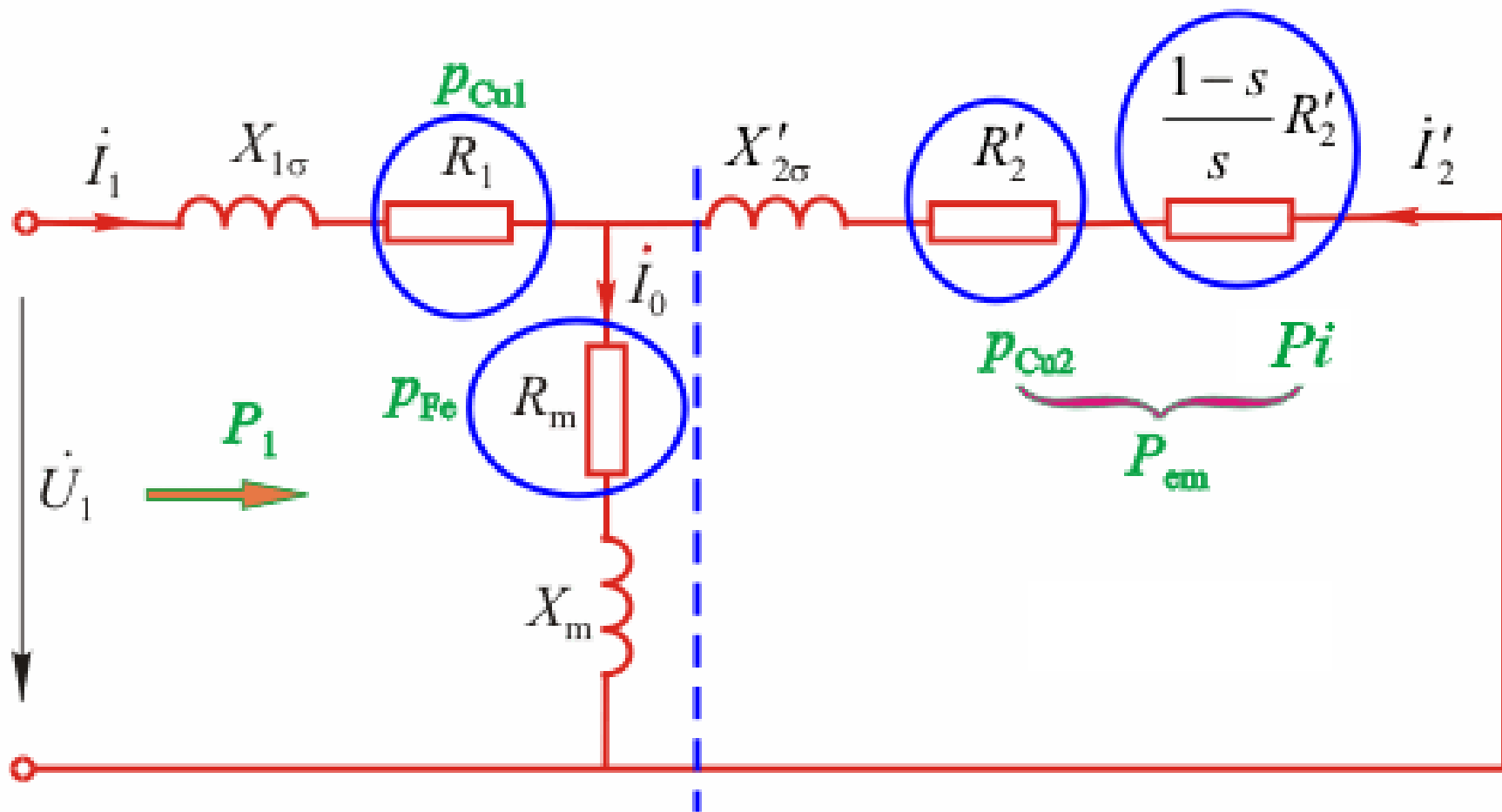
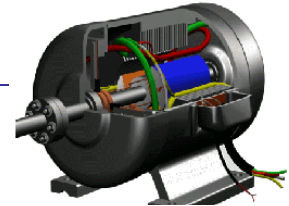




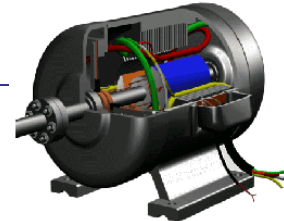
名称	符号	计算公式
输入电功率	P_1	$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1$
定子绕组铜耗	p_{Cu1}	$p_{Cu1} = m_1 I_1^2 R_1$
铁耗	p_{Fe}	$p_{Fe} = m_1 I_0^2 R_m$ 在正常运行时异步电动机的转速接近同步转速，转子电流频率很低(0.5~2)Hz，故转子铁耗可以忽略，因此电动机铁耗只有定子铁耗
电磁功率	P_{em}	$P_{em} = P_1 - p_{Cu1} - p_{Fe} = p_{Cu2} + P_{mec} = m_2 I_2^2 R_2 / s$ 借助于气隙中旋转磁场由定子传递给转子的功率
转子绕组铜耗	p_{Cu2}	$p_{Cu2} = m_2 I_2^2 R_2$
总机械损耗	P_{mec}	$P_{mec} = m_2 I_2^2 R_2 (1-s) / s$
机械损耗	p_{mec}	包括轴承摩擦损耗和通风损耗，主要与转速有关
附加损耗	p_{ad}	难准确计算，通常估算约为电机额定功率的0.5%~1%。
输出机械功率	P_2	转子轴上输出的机械功率

$$P_1 = P_2 + p_{mec} + p_{ad} + p_{cu2} + p_{cu1} + p_{Fe} = P_2 + \sum p$$





异步电机的T型等效电路表示的各种功率



- 电磁功率（通过基波旋转磁场传递到转子）

$$P_M = P_1 - P_{cu1} - P_{Fe}$$

- 总的机械功率（内功率）

$$P_i = P_M - P_{cu2}$$

- 轴上的输出功率 $P_2 = P_i - P_{mec} - P_{ad}$

$$P_M = p_{cu2} + P_i = m_1 I_2'^2 r_2' + m_1 I_2'^2 r_2' \frac{1-s}{s}$$

$$= \frac{m_1 I_2'^2 r_2'}{s} = \frac{p_{cu2}}{s}$$

$$P_M = m_1 I_2'^2 \frac{r_2'}{s} = m_1 E_2' I_2' \cos \theta_2$$

$$p_{cu2} = s P_M$$

$$\frac{P_i}{P_M} = (1-s) = \frac{n}{n_1}$$





异步电动机转矩平衡

- 由功率平衡式两边除以转子机械角速度 Ω 得到

$$T_2 = T - T_{mec} - T_{ad} = T - T_0$$

T_2 ——负载转矩，电动机轴上的输出机械转矩

T ——电动机轴上的总的机械转矩，也是电磁转矩

T_{mec} ——机械损耗转矩； T_{ad} ——附加损耗转矩；

$T_0 = T_{mec} + T_{ad}$ ——空载制动转矩



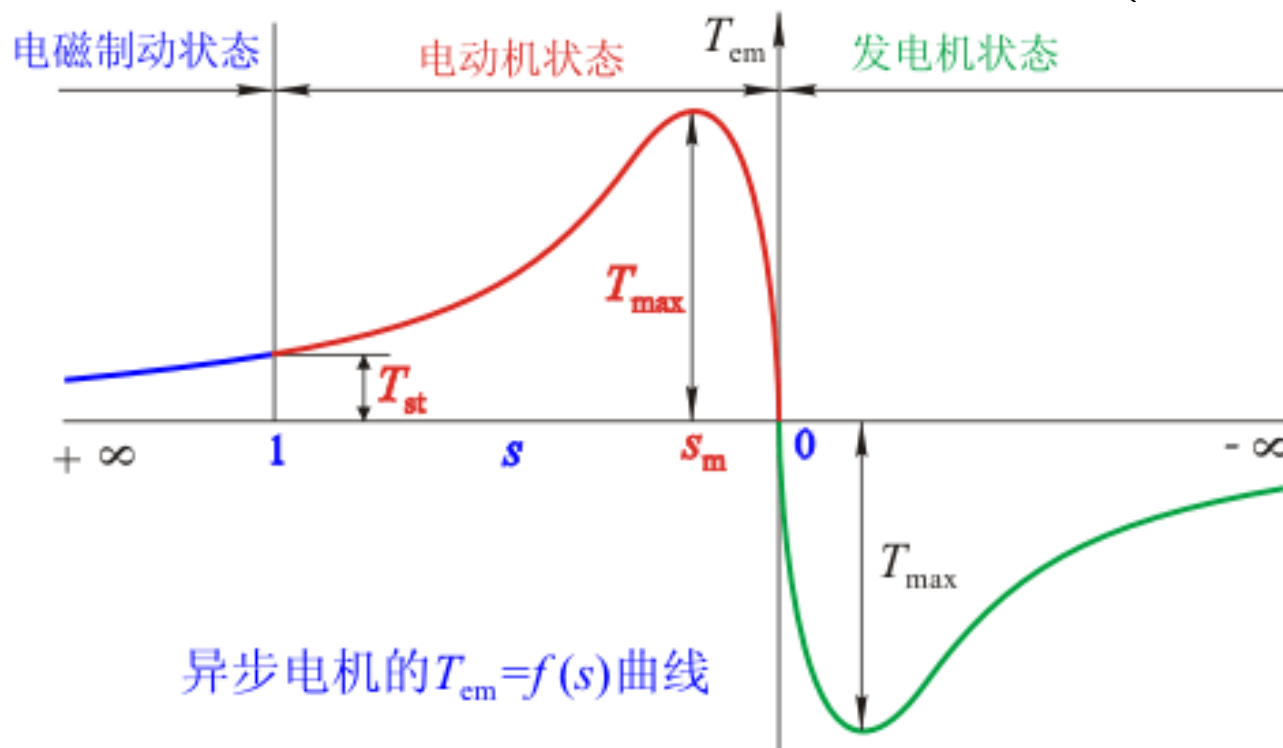


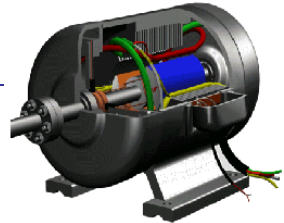
机械特性： $T \sim s$ 曲线

根据较准确的近似等效电路

$$T = \frac{P_M}{\Omega_1} = \frac{P_i}{\Omega} = \frac{p}{\omega_1} m_1 I_2'^2 \frac{r_2'}{s}$$

$$= \frac{m_1 p}{\omega_1} U_1^2 \frac{\frac{r_2'}{s}}{\left(r_1 + c_1 \frac{r_2'}{s} \right)^2 + \left(x_1 + c_1 x_2' \right)^2}$$





电磁功率还有一种表示方式

$$T = \frac{p}{\omega_1} m_1 E_2' I_2' \cos \theta_2 = \frac{pm_1}{\sqrt{2}} N_1 k_{N1} \Phi_m I_2' \cos \theta_2$$

$$= C_T \Phi_m I_2' \cos \theta_2$$

$$I_2' = \frac{\dot{E}_2'}{\sqrt{\left(\frac{r_2'}{s}\right)^2 + x_2'^2}}$$

$$\dot{E}_2' = \dot{E}_1 = \dot{U}_1 - \dot{I}_1 Z_1$$

$$\cos \theta_2 = \frac{\frac{r_2'}{s}}{\sqrt{\left(\frac{r_2'}{s}\right)^2 + x_2'^2}}$$

负载较小时, s 很小

\dot{E}_2' 变化不大, 近似 Φ_m 不变

$$I_2' = \frac{\dot{E}_2'}{\sqrt{\left(\frac{r_2'}{s}\right)^2 + x_2'^2}} \approx \frac{\dot{E}_2'}{r_2'/s} = s \frac{\dot{E}_2'}{r_2'}$$

$$\cos \theta_2 = \frac{\frac{r_2'}{s}}{\sqrt{\left(\frac{r_2'}{s}\right)^2 + x_2'^2}} \text{ 较大}$$

$T = C_T \Phi_m I_2' \cos \theta_2$ 近似与 s 成正比

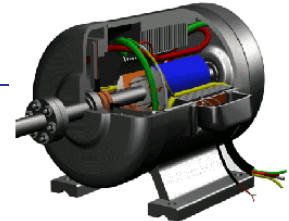
当 s 较大后

$$I_2' = \frac{\dot{E}_2'}{\sqrt{\left(\frac{r_2'}{s}\right)^2 + x_2'^2}} \text{ 增加减慢}$$

$$\cos \theta_2 = \frac{\frac{r_2'}{s}}{\sqrt{\left(\frac{r_2'}{s}\right)^2 + x_2'^2}} \text{ 减小较多}$$

$T = C_T \Phi_m I_2' \cos \theta_2$ 随 s 增大而下降
进入不稳定工作区域





- 临界转差率：产生最大转矩时的转差率

$$s_k = \pm \frac{c_1 r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2}}$$

- 最大转矩

$$T_{\max} = \pm \frac{pm_1}{\omega} U_1^2 \frac{1}{2c_1 \left[\pm r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2} \right]}$$

性质：

与U平方成正比，随电源频率增大而减小

与定转子漏抗之和成反比，发电机时 T_{\max} 稍大

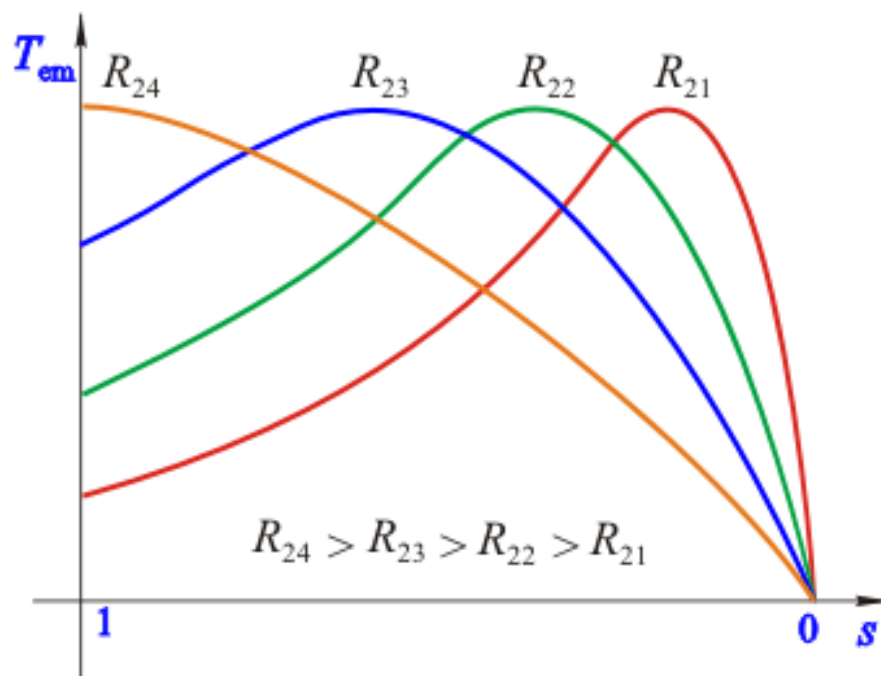
与转子电阻无关

s_k 与转子电阻近似成正比





临界转差率与转子电阻的关系



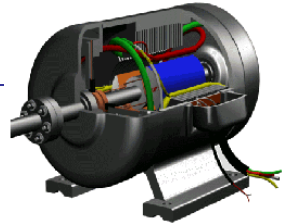
转子回路串电阻对 $T_{em}=f(s)$ 曲线的影响

- 最大转矩倍数：最大转矩与额定转矩之比

$$k_m = \frac{T_{\max}}{T_N}$$

- 普通电机 $k_m=1.8—2.5$ ，在有特殊要求时也可特殊制造成 $k_m=2.8—3.0$ 。





起动转矩: $s=1$

$$T_{st} = \frac{m_1 p}{\omega_1} U_1^2 \frac{r_2'}{(r_1 + c_1 r_2')^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2} \quad K_{st} = \frac{T_{st}}{T_N}$$

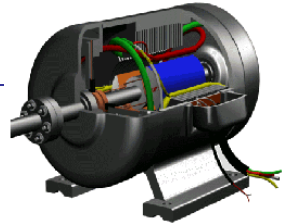
电磁转矩的简化计算

$$T = \frac{p}{\omega_1} m_1 I_2'^2 \frac{r_2'}{s} = \frac{m_1 p}{\omega_1} U_1^2 \frac{\frac{r_2'}{s}}{\left(r_1 + c_1 \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2}$$

条件: 略去 r_1 , 取 $c_1=1$

$$T = \frac{m_1 p}{\omega_1} \frac{U_1^2}{2x_k} \frac{2}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}} = T_{\max} \frac{2}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}}$$





稳态运行范围

$$\text{转矩与运行的关系} \quad T - T_L = T_J = J \frac{d\Omega}{dt}$$

- 当 $T > T_L$ 时，加速转矩 T_J 为正值，电动机加速。
- 当 $T < T_L$ ， T_J 为负值，电动机减速。
- **当 $T = T_L$ 时， $T_J = 0$ ，转速才能维持不变**，电动机处于平衡状态。
- 电机在运行时会受到外界因素的扰动(或由于电路的原因使 T 发生变化，或由于机械的原因使 T_L 发生变化)，破坏了稳态平衡，使转速发生变化。
- 稳定——若扰动因素消除后，电动机的转速仍然能恢复到原有的状态。
- 不稳定——若扰动因素消除后，电动机的转速**不能恢复**到原有的状态。



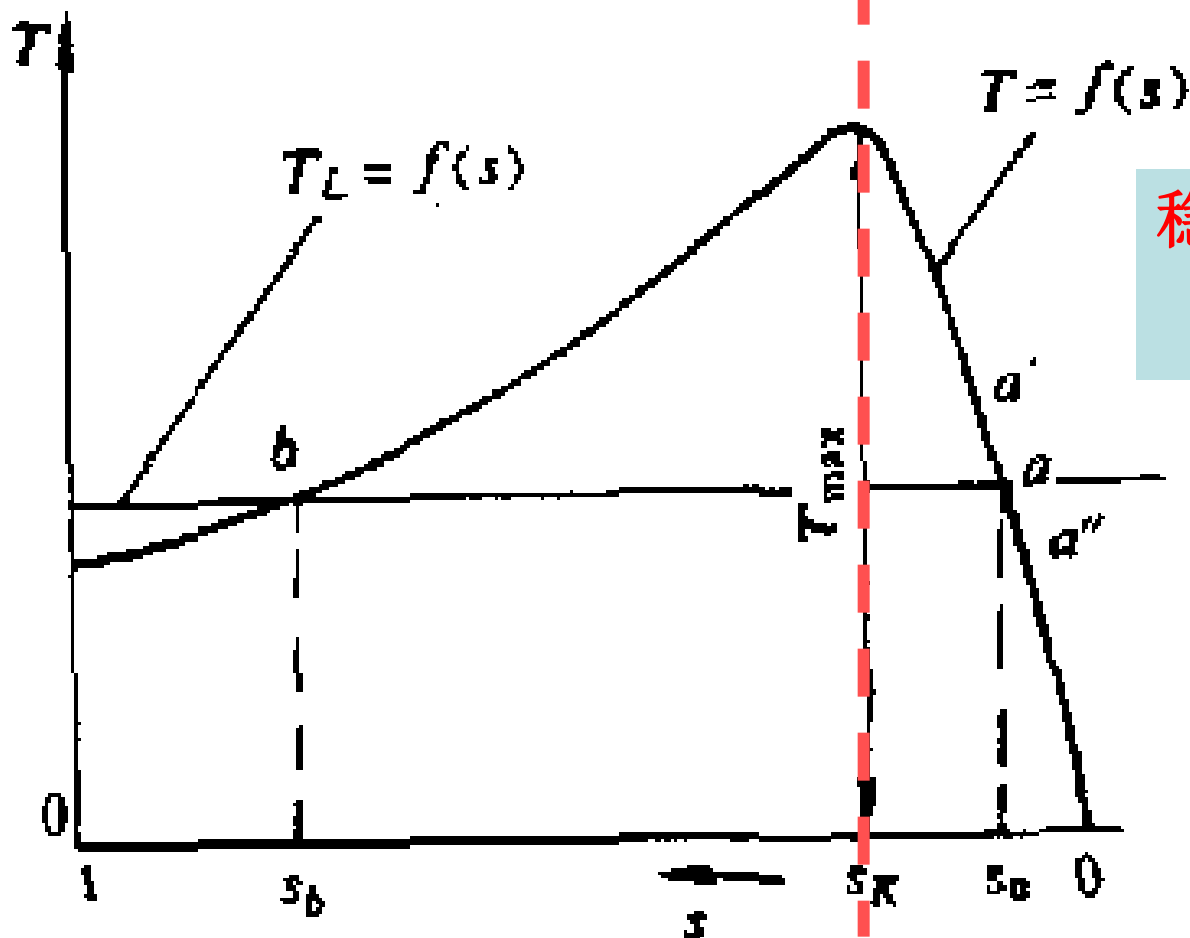
异步电动机的机械特性及稳定运行条件



$s > s_k$ ← ———→ $s < s_k$

随着转速的增加，电磁转矩随之增大，不能保持稳定运行

随着转速的增加，电磁转矩减少，能保持稳定运行



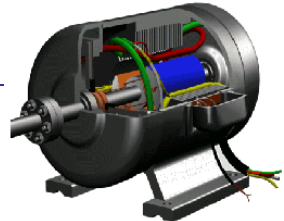
稳定运行条件

$$\frac{dT}{ds} > \frac{dT_L}{ds}$$

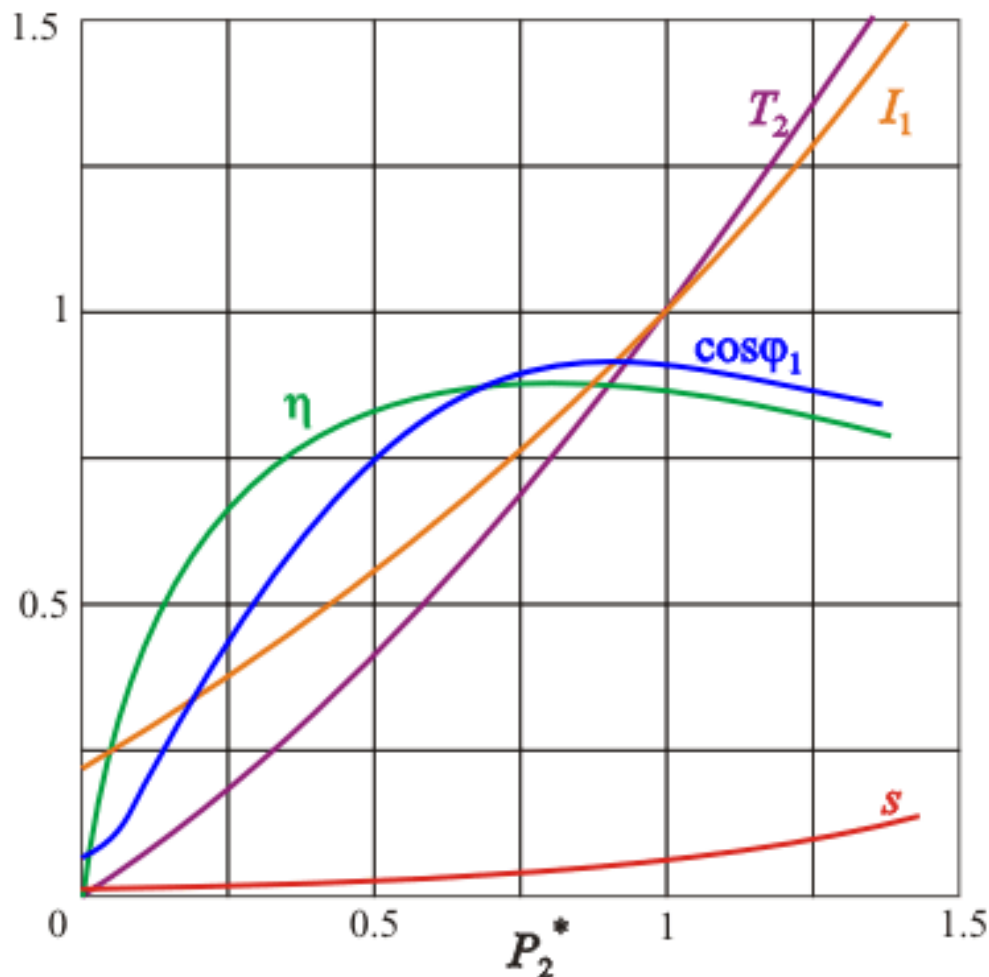
临界转差率 s_k



东南大学
电气工程学院

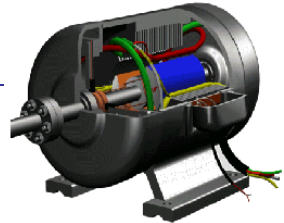


- 条件：外施电源电压 U 和频率 f 保持不变
- 特性：转速 n 、输出转矩 T_2 、定子电流 I_1 、定子功率因数 $\cos\theta_1$ 、效率 η 等与输出功率 P_2 的关系曲线。



异步电机的工作特性





转速特性：硬特性

- 电动机稳态运行时必须满足转矩平衡 $T=T_0+T_2$

空载时， $T_2=0$ ， $T=T_0$ ，只需较小转子电势产生较小转子电流产生较小的电磁转矩——空载转速很接近同步转速，转差很小。

随着负载增大，为维持转矩平衡需较大电磁转矩，转差率随之增大，但**变化不大**。

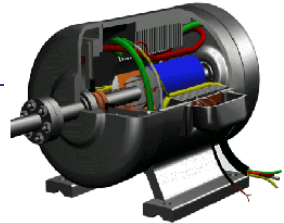
（如 $SN=0.01-0.05$ ）

负载转矩特性

- 在正常运行范围内，转速变化不大（**硬特性**），负载转矩与输出功率近似为直线。

$$T_2 = \frac{P_2}{\Omega} = \frac{P_2}{2\pi \frac{n}{60}}$$





定子电流特性

- 随着负载增加, I_2' 相应增大, 定子电流 I_1 也相应增大。

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_m - \dot{I}_2' \quad \text{相量和}$$

- I_2' 与输出功率 P_2 不成正比, I_1 与输出功率呈非线性关系。

功率因数特性

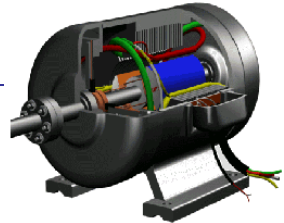
- 空载运行时, 电流是激磁电流, 其主要成分是磁化电流 (无功分量), 功率因数很低, $\cos\theta_1 \approx 0.2$
- 负载后时, 转子电流增大。 $\theta_2 = \arctg(sx_2/r_2)$

轻载时, s 很小, θ_2 很小, $\cos\theta_2 \approx 1$, 转子电流的主要成分是有功电流
随着负载的增大, 定子电流的增长主要是有功分量增加, $\cos\theta_1$ 迅速增大。

当**负载较大** (增大到一定程度) 时, s 增大, θ_2 增大, 转子电流的无功分量增加较快, 定子的无功电流随之增大, $\cos\theta_1$ 反趋于减小。

- 在某一负载时有最大功率因数, 设计电机时, 通常使在额定负载或略低于额定负载时有最大功率因数。





效率特性

- 效率随负载而变化的规律决定于损耗的分配比例

机械损耗 p_{mech} ：与转速有关

铁耗 p_{Fe} ：与磁通密度有关。异步电机的转速基本不变，如电源电压和频率保持不变，则机械损耗与铁耗基本保持不变——合称为不变损耗。

铜耗正比于负载电流的平方，定、转子铜耗合称为可变损耗。

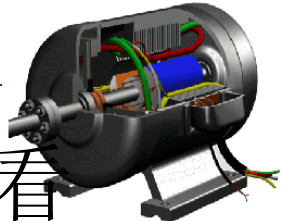
- 空载时， $P_2=0$ ， $\eta=0$ 。

随着 P_2 增大，效率迅速增大，直到某一负载时，其可变损耗等于不变损耗，效率达到最大。

负载再增加，铜耗急剧增大，效率反而降低。

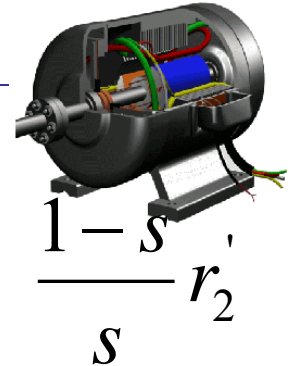
- 设计时最大效率在0.7-1范围内，且在此范围内效率变化不大





- 异步电机从基本电磁原理和分析方法来看与变压器很相似。可用类比方法来研究异步电动机，它们的电势、磁势平衡方程式、等效电路和相量图的形式是相同的，但有明显差别，主要是磁场性质不同。
- 定转子感应电势的大小、频率不同，异步电机的等效电路必须要同时进行**绕组归算**和**频率归算**。

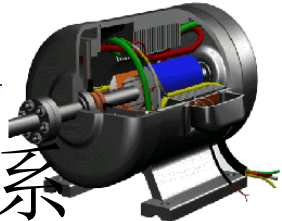




- 在使用异步电动机等效电路时应注意：
- 异步电动机输出的机械功率在等效电路中用模拟电阻表示。
- 异步电机有气隙存在，激磁电流较变压器的大，等效电路的简化应作修正。
- 异步电动机将电能转换成机械能，电磁转矩是关键量，电磁转矩与电磁功率成正比。

$$T = C_T \Phi_m I_2' \cos \theta_2 \quad T = T_{\max} \frac{2}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}}$$

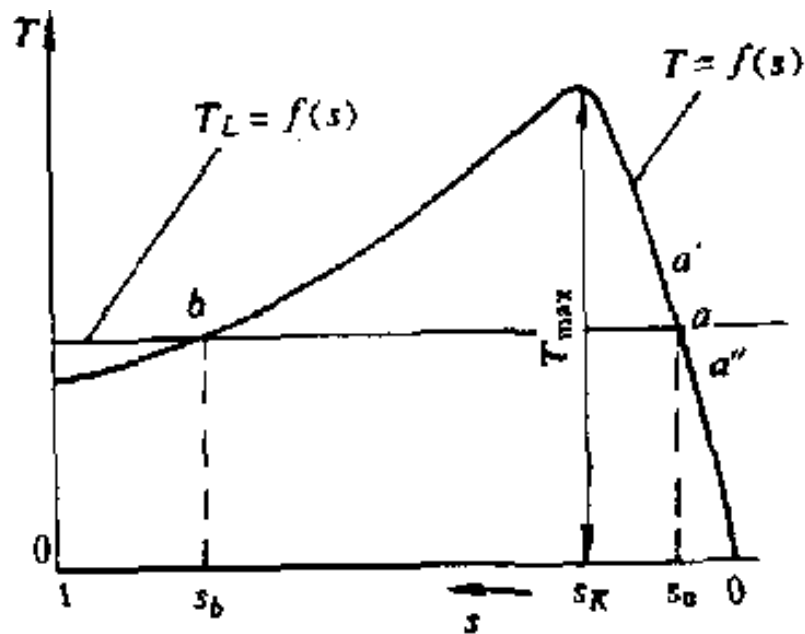




- 机械特性：电磁转矩与转差率之间的关系曲线。
- 工作特性：指随着负载变化，其转速、输出转矩、定子电流、功率因数、效率等的变化曲线。
- 从使用的观点看，定子电流是关键量，效率和功率因数是重要的力能指标，应掌握**计算方法和变化规律**。



电压降低，T-S曲线将下移，**注意：**
 s_k 位置不变；



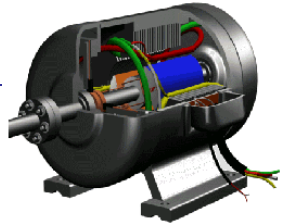
S增大，转速降低；机械损耗略有下降；

气隙磁通相应减小，**铁耗下降**；电磁转矩不变，则转子电流和定子电流增大，**定、转子铜耗增大**；

若轻载时，铁耗占主要成分，效率有提高；

若重载时，铜耗占主要成分，效率略下降；

激磁电流减小，定子电流增大，功率因数提高。



将设计为60Hz的电动机应用于50Hz的电压下，如电压大小和输出功率不变，分析其转速、内部损耗、功率因数和效率、起动转矩和最大转矩将如何变化？

电源电压大小不变，频率下降，则主磁通相应增加到 $6/5$ ，定子、转子漏抗相应减小为 $5/6$ ；

由转矩公式，最大转矩、起动转矩均有增大；

同步速下降到 $5/6$ ，则电机转速应下降到 $5/6$ ，机械损耗降低；

输出功率不变，则电磁转矩需增加到 $6/5$ ，转差率略有增大，转子电流有功分量基本不变，转子功率因数略增大，转子电流略减小，转子铜耗减小不多；

由磁化曲线，磁通增加，铁耗增大，激磁电流增加。一般电机磁通处于饱和区，激磁电流增加较多；功率因数下降。

定子电流增大，定子铜耗增大，效率有下降。

